

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ – МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Д.М. Бенин, Л.А. Журавлева

# ТУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Монография



Москва - 2021

УДК 630

Б 46

## Рецензенты:

Д.т.н., зав. отделом модернизации технических средств и технологии полива ФГБОУ ВО ВолжНИИГиМ

Н.Ф. Рыжко

К.т.н., доцент кафедры «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

О.В. Кабанов

Б 46

Бенин Д.М., Журавлева Л.А.

Тушение природных пожаров в условиях дефицита водных ресурсов: монография / Л.А. Журавлева. – Москва: ФГБОУ ВО РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА, 2021 г. – 122 с.

ISBN 978-5-00140-827-7

В монографии рассмотрены технические решения, и технологии, позволяющие уменьшить расход воды, затрачиваемой на тушение природных пожаров и увеличить скорость тушения по сравнению с традиционными методами. Рассмотрена возможность применение водяного пара, мелкодисперсной распыленной воды и двухфазных сред (водяной пар-вода) в качестве огнетушащих средств, исследованы их характеристики. Установлены возможные механизмы тушения струёй водяного пара. Оптимизированы и разработаны геометрические параметры парогенераторных установок. Определена эффективность предложенного метода в сравнении с другими методами тушения низовых лесных и степных пожаров.

Монография представляет интерес для научных работников, конструкторов, студентов, магистров и аспирантов специальностей, связанных с пожарной и техносферной безопасностью, инженерно-технических работников, занятых в сфере сельского и лесного хозяйства.

ISBN 978-5-00140-827-7

УДК 631

© Бенин Д. М. 2021

© ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

	СОДЕРЖАНИЕ	стр.
	ВВЕДЕНИЕ.....	5
1	ЛЕСНЫЕ РЕССУРСЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	6
2	СТАТИСТИКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.....	8
3	АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ. МЕХАНИЗМ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ.....	12
4	ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПРИ ТУШЕНИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ. СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ТУШЕНИЯ.....	20
	4.1 Способы тушения, непосредственно воздействующие на фронт пожара.....	21
	4.2 Ранцевые огнетушители.....	29
	4.3 Анализ веществ повышающих эффективность тушения лесных пожаров .....	34
	4.4 Мобильные средства с активными рабочими органами для предотвращения и тушения лесных пожаров.....	37
	4.5 Способы уменьшения расхода огнетушащих средств.....	42
5	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ, ДВУХФАЗНЫХ СРЕД (ВОДЯНОЙ ПАР-ВОДА) И ПАРА В КАЧЕСТВЕ ОГNETУШАЩИХ СРЕДСТВ.....	43
	5.1 Распыленная вода.....	43
	5.2 Водяной пар.....	52
	5.3 Свойства двухфазных жидкостей. Характерные формы парожидкостных течений в штанге парогенератора.....	56
	5.4 Подбор конструктивных параметров парогенератора.....	62
6	КРАТКАЯ ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	64
7	РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ.....	84
8	ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУИ ВОДЯНОГО ПАРА.....	87
9	ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУИ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ТУШЕНИИ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ.....	98

10	СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА С ИМЕЮЩИМИСЯ СРЕДСТВАМИ И МЕТОДАМИ ПРИ БОРЬБЕ С НИЗОВЫМИ ЛЕСНЫМИ И СТЕПНЫМИ ПОЖАРАМИ.....	104
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112

## ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары ежегодно наносят огромный ущерб людям и окружающей среде. В России наблюдается ежегодный прирост площадей лесных пожаров. В настоящее время гибнет лес на территории более 8 миллионов гектаров.

Известно, что в районах интенсивного ведения лесного хозяйства возникает около 85-90 % лесных пожаров, а площадь, пройденная ими, достигает 15-20 % всех пожаров.

Выполнение технологического процесса тушения лесных пожаров по существующим технологиям связано с большими затратами энергоресурсов, нарушением лесных биогеоценозов и экологии лесов и ограничено трудностями движения техники по лесу. Поэтому поиск путей тушения лесных пожаров на основе применения экологически безопасных энергосберегающих и экономически выгодных технологий является актуальной задачей.

В настоящее время известно достаточно много методов борьбы с лесными пожарами. В целом их можно разделить на два основных типа: методы тушения, направленные на локализацию зоны горения и непосредственно воздействующие на фронт пожара. Предпочтение при этом следует отдавать второму типу как более оперативному и экологически безопасному. В зависимости от воздействия на зоны пиролиза методы тушения, непосредственно воздействующие на фронт пожара, можно условно разделить также на две группы:

- механического воздействия ударными волнами (сдув);
- физико–химического воздействия.

Цель проводимого исследования - повышение эффективности тушения природных пожаров в условиях дефицита водных ресурсов, в частности за счет применения мелкодисперсной распыленной воды, двухфазных сред (водяной пар-вода), водяного пара в качестве огнетушащих средств, разработка технических средств для их создания.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

-На основании анализа выбрать метод тушения лесных низовых и степных пожаров, огнетушащее средство, обладающее соответствующими характеристиками и экономической целесообразностью.

-Провести теоретические исследования свойств водяного пара, комбинаций пара и тонкораспыленной воды как огнетушащих средств.

-Разработать устройство для создания водяного пара, определить их конструктивно-технологические параметры.

-Экспериментально исследовать эффективность использования водяного пара при тушении различных очагов горения.

-Определить эффективность предложенного метода и сравнить его результаты с другими методами тушения низовых лесных и степных пожаров.

Полученные результаты могут быть использованы в практической деятельности по тушению лесных низовых и степных пожаров, а также при создании новых средств пожаротушения.

## 1 ЛЕСНЫЕ РЕССУРСЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

По определению, лесной фонд – это часть территории страны, занятая лесом или предназначенная для нужд лесного хозяйства. Т.е. это совокупность лесных и нелесных земель (занятых находящимися в лесах пашнями, сенокосами, пастбищами, водами, дорогами, просеками, усадьбами, болотами, песками и др.).

К лесным землям относятся земли, покрытые лесной растительностью, и земли предназначенные для ее восстановления: несомкнувшиеся лесные культуры, лесные питомники и плантации, естественные редины, фонд лесовосстановления (гари, погибшие насаждения, вырубki, прогалины, пустыри).

К землям, покрытым лесной растительностью относятся:

- земли, занятые лесными насаждениями естественного и искусственного происхождения с полнотой 0,4 доли единицы и выше в возрасте молодняков и с полнотой 0,3 доли единицы и выше в возрасте, превышающем возраст молодняков;

- земли, занятые кустарниками, на которых в силу естественно-географических условий не могут произрастать древесные породы или на которых специально организуются кустарниковые хозяйства;

- плантации лесных древесных пород, предназначенные для ускоренного выращивания лесных насаждений с целью получения целевых сортиментов или древесной массы для последующей переработки.

Леса, расположенные на землях лесного фонда, по целевому назначению подразделяются на:

- защитные,
- эксплуатационные,
- резервные.

Защитные леса подлежат освоению в целях сохранения средообразующих, водо-охраных, защитных, санитарно-гигиенических, оздоровительных и иных полезных функций лесов с одновременным использованием лесов при условии, если это использование совместимо с целевым назначением защитных лесов и выполняемыми ими полезными функциями.

Эксплуатационные леса подлежат освоению в целях устойчивого, максимально эффективного получения высококачественной древесины и других лесных ресурсов, продуктов их переработки с обеспечением сохранения полезных функций лесов.

Резервные леса – леса, в которых в течение двадцати лет не планируется осуществлять заготовку древесины.

Площадь земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены леса представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Площадь земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены леса, млн. га (по данным Рослесхоза) [42]

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019
Площадь земель лесного фонда и земель иных категорий, на которых расположены леса, в т.ч.	1184,1	1184,3	1184,5	1187,7	1187,6
лесная	890,9	891,4	891,4	894,1	894,1
из нее покрытая лесной растительностью	795,0	795,1	794,7	796,9	794,9
Площадь земель лесного фонда, на которых расположены леса, в т.ч.	1146,8	1146,7	1147,0	1146,1	1146,2
эксплуатационные	598,8	596,5	596,1	595,2	594,5
резервные	268,5	268,4	266,9	266,4	266,2
защитные	279,1	281,3	283,1	283,6	284,6
в том числе по категориям:					
леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях	0,4	0,5	1,3	1,8	2,6
леса, расположенные в водоохраных зонах	12,6	15,7	17,5	17,8	18,3
леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов – всего, из них	21,7	21,9	21,9	22,1	22,1
леса, расположенные в первом и втором поясах зон санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
защитные полосы лесов, расположенные вдоль железнодорожных путей общего пользования, федеральных автомобильных дорог общего пользования, автомобильных дорог общего пользования, находящихся в собственности субъектов РФ	5,3	5,4	5,4	5,5	5,5

зеленые зоны, лесопарки	13,8	13,9	13,9	14,0	14,0
леса, расположенные в первой, второй и третьей зонах округов санитарной (горно-санитарной) охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ценные леса – всего, в т.ч.	244,4	243,2	242,4	241,9	241,6
государственные защитные лесные полосы	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
противоэрозионные леса	14,7	14,6	14,6	14,7	14,7
леса, расположенные в пустынных, полупустынных, лесостепных, лесотундровых зонах, степях, горах	132,6	132,5	132,5	132,5	132,5
леса, имеющие научное или историческое значение	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
запретные полосы лесов, расположенные вдоль водных объектов	27,8	27,6	27,4	27,3	27,0
нерестоохранные полосы лесов	56,1	55,4	54,9	54,7	54,7
Леса, в отношении которых лесоустройство не проводилось	0,4	0,5	0,9	0,9	0,9
Общий запас древесины, млрд м <sup>3</sup>	82,8	82,7	82,8	82,8	82,6
Лесистость территории, процентов	46,4	46,4	46,4	46,5	46,4

Площадь земель лесного фонда, покрытая лесной растительностью, по основным лесообразующим породам, тыс. га по данным Рослесхоза представлена в таблице 2. Мероприятия лесовосстановления и лесоразведения – в таблице 3.

Таблица 2 - Площадь земель лесного фонда, покрытая лесной растительностью, по основным лесообразующим породам, тыс. га (по данным Рослесхоза) [42]

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019
Площадь земель лесного	770524	770435	770173	768513	766626



фонда, покрытая лесной растительностью					
из нее по основным лесообразующим породам:					
хвойным	524693	524440	523794	521797	520077
твердолиственным	18237	18253	18271	18394	18437
мягколиственным	151532	151696	151840	152246	152403

Таблица 3 - Лесовосстановление и лесоразведение, тыс. га. (по данным Рослесхоза) [42]

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019
Лесовосстановление	803	840	962	940	1068
в том числе:					
искусственное	182	179	177	172	177
естественное	603	644	766	751	874
комбинированное	18	18	19	17	16
Лесоразведение	5,0	3,8	3,5	10,0	11,1
в том числе:					
создание на землях сельскохозяйственного назначения	3,6	3,2	2,5	9,2	3,1
из них:					
полезащитных лесных полос	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1
противоэрозионных лесных насаждений	3,6	3,2	2,3	8,9	2,9
Площадь рубок ухода за лесом	549	526	543	536	464
в том числе:					
осветления и прочистки	268	258	263	256	239
прореживания	86	83	92	85	74
проходные	190	182	184	173	142
обновления и реформирования	4,2	3,0	4,3	1,2	1,8
ландшафтные рубки	0,7	0,7	0,8	0,6	0,6
рубки реконструкции	11	11	10	13	6
Ввод молодняков в категорию хозяйственно-ценных лесных насаждений	1053	1037	1112	1151	1038

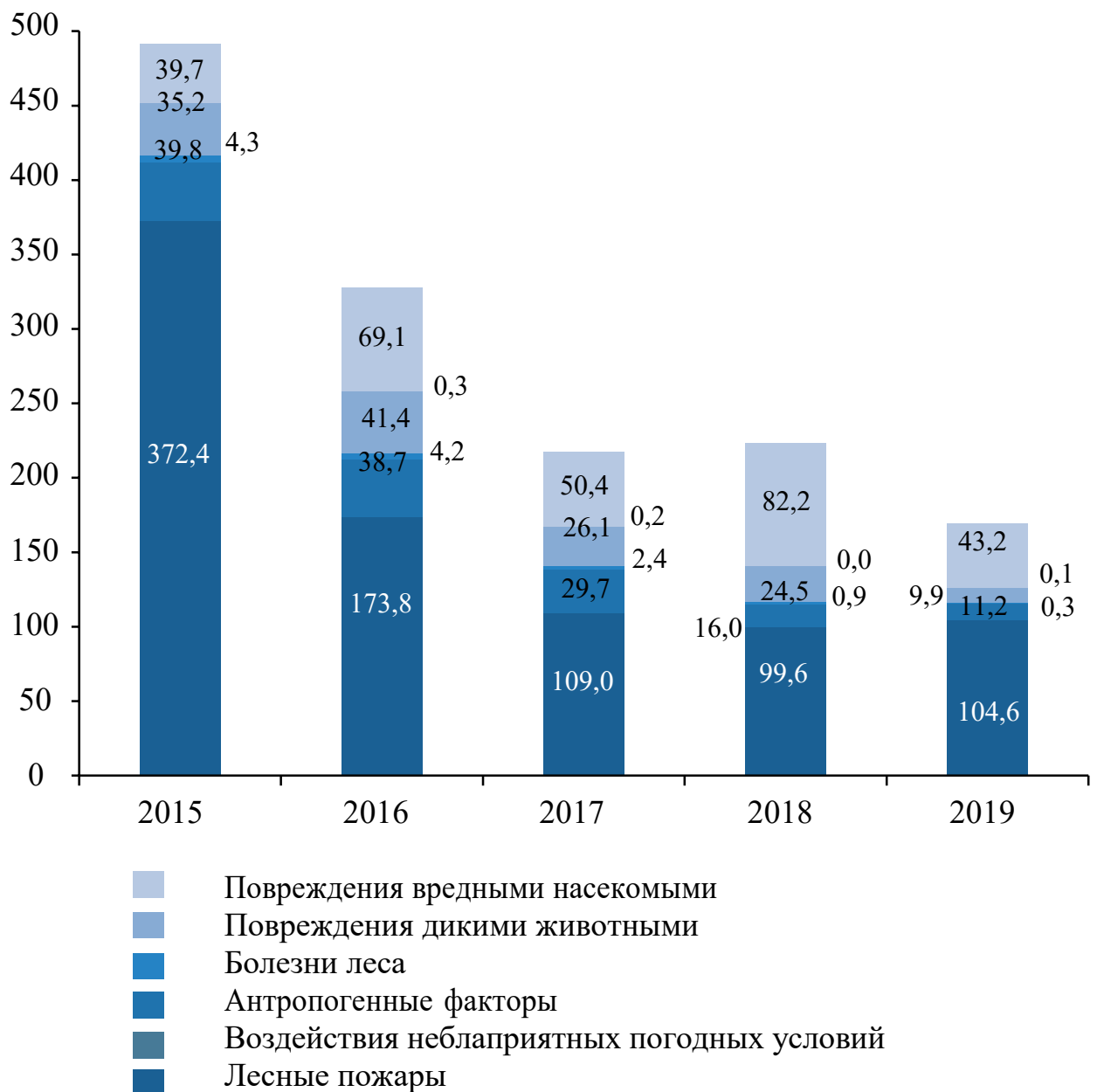


Рисунок 1 - Площадь погибших лесных насаждений, тыс. га

Анализ причин гибели лесных насаждений представлен на рисунке 1. Лесные пожары являются наиболее распространенной причиной, несмотря на общее снижение площади пожаров за последние пять лет.

Площадь погибших хвойных насаждений в зависимости от причин показывает аналогичную ситуацию, таблица 4.

Таблица 4 - Площадь погибших хвойных лесных насаждений, тыс. га [42]

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019
Погибло лесных насаждений, из них:	412,6	270,8	174,3	182,8	142,7

от повреждения вредными насекомыми	39,0	68,1	48,0	81,7	43,0
от повреждения дикими животными	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0
от болезней леса	28,0	35,3	21,0	18,9	8,7
от антропогенных факторов	4,2	4,1	2,2	0,9	0,2
от воздействия неблагоприятных погодных условий	31,1	31,8	15,8	9,5	7,7
от лесных пожаров	310,1	131,3	87,2	71,7	83,1

## 2 СТАТИСТИКА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Лес занимает огромные площади на Земле, почти третью часть всей суши. Леса занимают 38 млн км<sup>2</sup>, из которых человек посадил 264 млн. га, а это всего 7% от общего числа. На территории России площадь леса составляет 8,5 млн км<sup>2</sup> (851 млн га).

Ежегодно в России регистрируется от 10 до 35 тыс. пожаров в лесах охватывающих площади до 2,5 млн. га [2, 22, 42].

Убыток от лесных пожаров является катастрофическим для человечества и окружающей его среды. Лесные пожары приводят к огромным материальным затратам заболеваниям и гибели людей, порче и уничтожению имущества, загрязнению атмосферы.

Лесные пожары наносят огромный урон экологии, для восстановления леса требуется несколько десятков лет. В случае, когда промышленные объекты находятся в непосредственной близости от леса, ущерб от пожара может быть колоссальным. Но наибольшую опасность представляет угроза населенным пунктам, когда лесной пожар может стать причиной смерти людей.

На территории лесного фонда России ежегодно регистрируется от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 0,5 до 2,5 млн. га. [2, 22, 42]

За период 1994–2005 гг. в Российской Федерации погибло 5308 тыс. га лесных насаждений (в среднем 442 тыс. га в год). Из этой площади 70% погибло от пожаров, 14,3% – от воздействия неблагоприятных погодных условий, 12,9% – от повреждения вредными насекомыми и лишь 2,8% пришлось на весь комплекс прочих факторов (болезни, повреждения дикими животными, антропогенные факторы). За рассматриваемые 12 лет только в 1995 г. и в 2004 г. роль пожаров в гибели лесов не являлась главенствующим фактором [2, 42].

Следует заметить что реальный экономический ущерб от лесного пожара складывается не только из урона нанесенного лесу, промышленным и другим объектам, но и из затрат связанных непосредственно с тушением. В этом случае становится очевидным, что важно не только обнаружить пожар, но и определить его точное местоположение и сделать это как можно раньше.

Надо учитывать, что в настоящее время принят закон, разграничивающий лесной и ландшафтный пожары. Это Федеральный закон от 22.12.2020 N 454-ФЗ и внесены соответствующие изменения в Федеральный закон от 21.12.94 N 69-ФЗ "О пожарной безопасности".

Даны следующие пояснения:

- ландшафтный (природный) пожар - неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в природной среде, охватывающий различные компоненты природного ландшафта;

- лесной пожар - разновидность ландшафтного (природного) пожара, распространяющегося по лесу.

Подобные разночтения, категории земель, на которых происходят возгорания и приводят к не соответствиям в статистике.

Например, согласно сводке ФБУ «Авиалесоохрана» в период с 1 января по 8 декабря 2020 года общая территория лесных угодий России, пройденная огнём, достигла 9,3 млн. гектаров.

Однако, данные ИСДМ-Рослесхоза сводки системы дистанционного мониторинга лесных пожаров - 16,5 млн гектаров.

Такое расхождение в данных статистик связано, по словам руководителя российского отделения Greenpeace, с тем, что возгорания на отдельных категориях земель (например, земли сельскохозяйственного назначения), согласно нынешнему Лесному кодексу, к категории лесных пожаров не относятся.

Лесные пожары на землях лесного фонда и землях иных категорий по данным Рослесхоза представлены в таблице 5, рис. 2.

Таблица 5 - Лесные пожары на землях лесного фонда и землях иных категорий (по данным Рослесхоза) [42]

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019
Число лесных пожаров, тыс.	12,3	11,0	10,9	12,1	13,6
Площадь лесных земель, пройденная пожарами, тыс. га	2748,9	2508,3	3282,1	7408,4	8678,0
Площадь нелесных земель, пройденная пожарами, тыс. га	220,8	365,7	1276,7	1210,1	1403,9
Сгорело лесных насаждений, млн м <sup>3</sup>	37,5	28,9	51,9	80,4	313,2

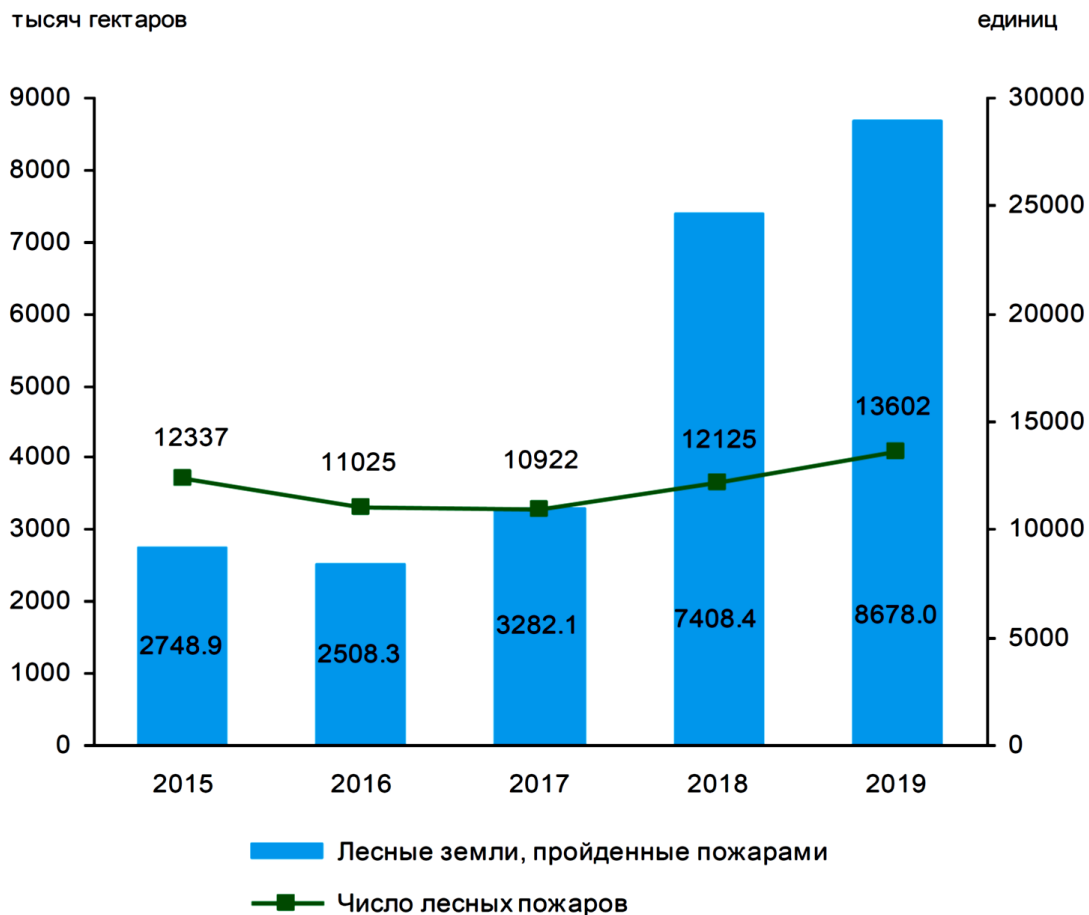


Рисунок 2 - Число лесных пожаров и площадь лесных земель, пройденная пожарами

Динамика основных показателей обстановки с лесными пожарами по округам за 2009 -2016 гг. представлена в таблице 6 [42].

Таблица 6 – Количество пожаров за 2009-2017 гг. по округам

Наименование субъекта РФ	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Российская Федерация	23228	33423	19743	19329	9991	16865	12337	11025
Центральный федеральный округ (ФО)	4242	6907	1288	276	244	1189	582	266
Северо-Западный ФО	1120	2163	2389	522	1906	1869	845	870
Южный ФО	193	206	144	50	21	52	115	152
Северо-Кавказский ФО	43	113	32	23	10	11	24	3
Приволжский ФО	3512	7665	891	653	805	923	787	718
Уральский ФО	5261	9836	4411	7078	2718	1943	1415	2541

Сибирский ФО	5636	5202	8750	8588	3222	8531	6880	4890
Дальневосточный ФО	3221	1331	1838	2139	1065	2347	1689	1585

По данным Рослесхоза, в среднем размер ущерба от лесных пожаров в год составляет около 20 млрд. руб., из которых от 3 до 7 млрд. составляет ущерб лесному хозяйству (потери древесины).

Основная причина возникновения лесных пожаров связана с хозяйственной деятельностью людей, которая определяется факторами антропогенного происхождения (более 80% загораний случается по вине населения). Установленной отчетностью по лесным пожарам учитываются 7 основных причин, вызывающих лесные пожары, в табл. 7 [42].

Таблица 7 - Причины лесных пожаров в лесном фонде Рослесхоза, %

Основные причины	1985г.	2016г.
Хозяйственная деятельность населения и неосторожное обращение с огнем отдыхающих	64,8	70,9
Сельскохозяйственные палы	7,3	4,3
Лесозаготовители	2,9	1,2
Изыскательские и экспедиционные работы	0,9	0,3
Другие причины	5,0	3,1
Молнии	16,0	16,1
Неустановленные причины	3,1	4,1

Причины лесных пожаров значительно варьируют и во многом зависят от освоенности лесных территорий. В районах интенсивного ведения лесного хозяйства возникает около 85-90 % лесных пожаров [22-25].

Такое положение складывается из-за имеющегося здесь большого количества источников огня. В то же время доступность лесных массивов способствует тушению лесных пожаров в начальной стадии их развития при минимальных потерях.

В удаленных районах количество лесных пожаров составляет 10-15 %, а охватываемая ими площадь 80-85 % общей площади пожаров в силу значительных потерь времени на их обнаружение. Анализ зависимости горимости лесов от их удаленности от населенных пунктов показывает, что на расстоянии до 5 км возникает [22-26]:

- До 5 км- 37,3 % лесных пожаров,
- от 5 до 10 км - 29,2 %,
- от 10 до 20 км -18,1 %,
- от 20 до 30 км - 8,2%,
- от 30 до 50 км - 3,7 %
- и более 50 км- 3,5 %.

Это распределение может меняться в зависимости от региона.

Успех борьбы с лесными и торфяными пожарами во многом зависит от их своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по их ограничению и ликвидации.

В 2019–2020 годах на оснащение регионов лесопожарной техникой в рамках федерального проекта «Сохранение лесов» было направлено 9,6 млрд рублей. Выделенные средства позволили регионам приобрести свыше 18 тысяч единиц лесопожарной техники и оборудования. Однако эти меры не гарантируют кардинального решения проблемы лесных пожаров. Вместе с тем на сокращение количества и площади лесных пожаров влияет не только техническая составляющая регионов, но и ряд других факторов, в том числе уровень организации охраны лесов от пожаров, включая кадровое обеспечение. Соответственно, решение проблемы требует комплексного подхода.

Анализ ситуации с лесными пожарами за пятилетний период (с 2015 по 2019 год) показал, что количество лесных пожаров увеличилось на 20,1 % и составило 13 602 случая, их площадь увеличилась в 3,8 раза и составила 10 009,8 тыс. га [42].

Ущерб от лесных пожаров в 2015–2019 годах находится в пределах от 13,5 до 56,4 млрд рублей с тенденцией к уменьшению к 2019 году.

Средства федерального бюджета в виде субвенций на оснащение субъектов Российской Федерации лесопожарной техникой и оборудованием составили 6 329,5 млн рублей на 2019 год и 3 265,3 млн рублей на 2020 год [41].

Выделение указанных субвенций позволит повысить оперативность тушения лесных пожаров и тем самым снизить ущерб от них.

Так, федеральный проект предусматривает показатель «Ущерб от лесных пожаров» со значениями, снижающимися с 2018 года к 2024 году в 2,6 раза (с 32,3 до 12,5 млрд рублей). Федеральным проектом в части результата «Оснащены специализированные учреждения органов государственной власти субъектов Российской Федерации лесопожарной техникой для проведения комплекса мероприятий по охране лесов от пожаров» предусмотрено финансирование из федерального и региональных бюджетов в объеме 22 543,0 млн рублей на 2019–2024 годы, из них из федерального бюджета – 21 300,0 млн рублей, или 94,5 % [41].

### **3 АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ. МЕХАНИЗМ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Лес по своей структуре является многоярусным. В настоящее время принято выделять следующие слои лесного биогеоценоза, которые необходимо учитывать при моделировании лесных пожаров [3, 27]:

- подстилка толщиной 2-5см;
- опад толщиной 6-8см;

- кустарники высотой 10-20см;
- травянистые растения;
- кустарники высотой до 2м;
- молодые деревья высотой до 6м;
- полог древостоя – совокупность крон взрослых деревьев;
- приземный слой атмосферы высотой до 200м;
- пограничный атмосферный слой высотой 1,5-2км.

Внутри объединенного слоя структура среды условно считается однородной.

Скорость распространения лесного пожара определяется следующими процессами – сушкой, пиролизом лесных горючих материалов, горением газообразных и конденсированных продуктов пиролиза, а также процессами переноса массы и энергии.

При низовых лесных пожарах сгорают лесные горючие материалы в нижнем ярусе леса. Особенностью таких пожаров являются невысокая скорость их распространения до 2 см/с и небольшая высота пламени – до 2,5 м. При пламенном горении лесных горючих материалов во фронте низового лесного пожара наибольшее количество тепловой энергии выделяется в результате горения газообразных продуктов пиролиза.

На рисунке 3 приведена структура фронта типичного низового лесного пожара, при отсутствии ветра [3].

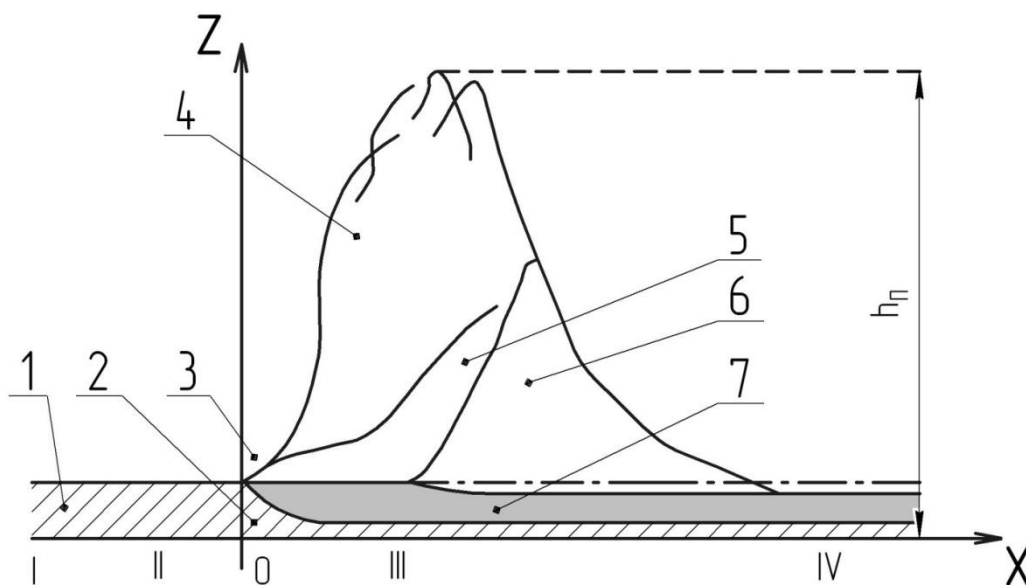


Рисунок 3 – Структура фронта опытного низового пожара:

1-опад; 2 – сечение поверхности, отделяющей свежий ЛГМ от газифицирующегося; 3 – область ламинарного и газо – фазного горения; 4 – турбулентный факел пламени; 5- газообразные продукты пиролиза ЛГМ; 6 – продукты горения конденсированного продукта пиролиза; 7- зона беспламенного горения (тления);  $h_p$  – высота факела пламени.



Энергетика лесного низового пожара характеризуется высокой интенсивностью. Температура во фронте лесного пожара изменяется в пределах  $15 \text{ кВт/м} < I < 10 \text{ МВт/м}$ . Максимальная температура горения  $900 \text{ К} < T_r < 1350 \text{ К}$ .

Плотность теплового потока меняется в границах  $3 \text{ кВт/м}^2 < g_{\text{п}} < 41,5 \text{ кВт/м}^2$ . Важнейшей характеристикой является скорость распространения. Известно, что в случае, когда влагосодержание превышает 13%, горение прекращается. Имеется зависимость скорости распространения фронта пожара от запаса лесных горючих материалов. Критическое значение, например для опада хвои, в среднем составляет  $m=0,1 \text{ кг/м}^2$ . Скорость распространения фронта пожара также зависит от угла наклона плоскости слоя ЛГМ к горизонтальной плоскости, плотности слоя и скорости ветра [3].

Распространение лесных низовых пожаров прекращается при выполнении следующих условий:  $W > W_{\text{к}}$ ,  $m < m_{\text{к}}$ ,  $c < c_{\text{к}}$ , где  $W_{\text{к}}$ ,  $m_{\text{к}}$ ,  $c_{\text{к}}$  - критические значения влагосодержания, запаса лесных горючих материалов и концентрации газообразных горючих продуктов пиролиза [1, 12, 24, 85].

В зависимости от того, где распространяется огонь, пожары делятся на низовые, верховые и подземные.

Верховые лесные пожары как правило, относят к разряду сложных лесных пожаров. В этот разряд включены так называемые пятнистые пожары. Это высокоинтенсивные лесные пожары, над которыми возникают мощные конвекционные потоки нагретого воздуха и продуктов сгорания. Эти потоки поднимают вверх и рассеивают перед кромкой пожара горящие частицы, вызывающие дополнительные загорания напочвенного покрова.

Если пожар распространяется по территории, относящейся к одному типу ландшафта, то он называется ландшафтно-однородным. В противном случае принято говорить о втором, или смешанном, типе лесного пожара.

Как правило, площадь горения и мощность смешанных лесных пожаров больше, чем однородных.

В свою очередь лесные пожары можно подразделить на простые и сложные. Под простым понимается лесной пожар, тип которого не меняется во все время процесса горения ЛГМ. Если тип пожара меняется в процессе его развития, пожар считается сложным.

По степени вовлечения фитомассы лесного биогеоценоза пожары подразделяются на низовые, верховые и почвенные.

При почвенных лесных пожарах сгорают ЛГМ в первом слое нижнего яруса леса, т.е. подстилка или торф.

Если при низовых лесных пожарах сгорают второй, третий и четвертый слои нижнего яруса, то это так называемые напочвенные пожары.

Верховой (беглый и устойчивый) - лесной пожар, распространяющийся по кронам деревьев. Древостой, как правило, гибнет полностью или большей частью. При беглом верховом пожаре огонь быстро распространяется по кронам деревьев в направлении ветра, а при устойчивом - огонь распространяется по всему древостою: от подстилки до крон.

Скорость продвижения устойчивого верхового пожара составляет в среднем 300-600 м/ч, достигая в отдельных случаях 4-5 км/ч [12, 29, 30].

Верховые пожары также можно разделить на три типа. Это – повальные, когда напочвенный покров и полог древостоя сгорают одновременно. Вершинные - когда огонь распространяется по кронам, опережая его движение по напочвенному покрову. А также пятнистые, когда создаются условия для массового разброса горящих частиц - веточек, кусочков коры и т.д. перед фронтом пожара.

В среднем по количеству случаев верховые пожары составляют около 1,5-2 %, а пройденная ими площадь – около 10-12 % от площади всех лесных пожаров.

Горючие материалы подразделяются на проводники горения (такие как тонкие части деревьев – хвоя, листья, веточки), на компоненты, поддерживающие горение (это напочвенный покров, ветки и сучья толще 7-10 мм в диаметре, подлесок) и задерживающие горение (кроны деревьев пожароустойчивых пород) [1, 7, 8].

Горение растительного покрова отличается большим разнообразием не только условий горения, но и физико-химических явлений, возникающих при этом. К основным из них можно отнести такие процессы, как возникновение очага горения, распространение фронта горения по покрову растительности, сгорание охваченного пламенем горючего материала и потухание фронта горения. При это, каждый их них – сложный многостадийный процесс, причём стадии протекают неодинаково для каждой из разновидностей растительного пожара.

Процесс горения проходит следующие фазы:

- Предварительный нагрев и подсушивание с выделением водяных паров (120°С); высушивание, выделение летучих горючих продуктов пиролиза, газофазное горение с выделением водяных паров, горючих веществ - 260°С.

- Воспламенение газов (315 - 425°С). Пламенное горение с выделением дыма, углекислого газа, водяных паров и несгоревших газов (650-1095°С).

- Обугливание и горение углей до полного сгорания горючих веществ.

В процессе горения выделяется большое количество тепла, которое передается окружающей среде путем конвекции, излучения, проводимости:

- Конвекция - это распространение высоких температур путем подъема массы горячего воздуха над местом горения в виде конвекционной колонки.

- Излучение - распространение высоких температур в виде лучевой энергии по радиусу во всех направлениях от источника горения.

- Теплопроводность - распространение высоких температур по горючим материалам от очага горения.

Горение лесных горючих материалов различают по типам:

- пламенное горение,
- беспламенное .

Каждый тип горения может переходить из одного в другой и имеет обе стадии - пламенную и беспламенную (горение углей). В зависимости от типа горения одна из них является преобладающей.

Наибольшее влияние на распространения пожара оказывают погодные условия. Например, дождь и высокая влажность ограничат и прекратят распространение пожара, а сильный ветер наоборот.

Если рассматривать рельеф местности, то он тоже оказывает определённое воздействие. Крутизна склонов напрямую влияет на развитие пожара, чем выше склон, тем больше скорость распространения. Скорость восходящих над пожарами потоков может достигать 35 м/с.

Скорость ветра почти полностью определяет контур пожар. Существенно увеличивает площадь пожара изменение направления ветра в период активного горения. Так на рис. 4 представлено посуточное распределение скорости ветра с метеостанции [32].

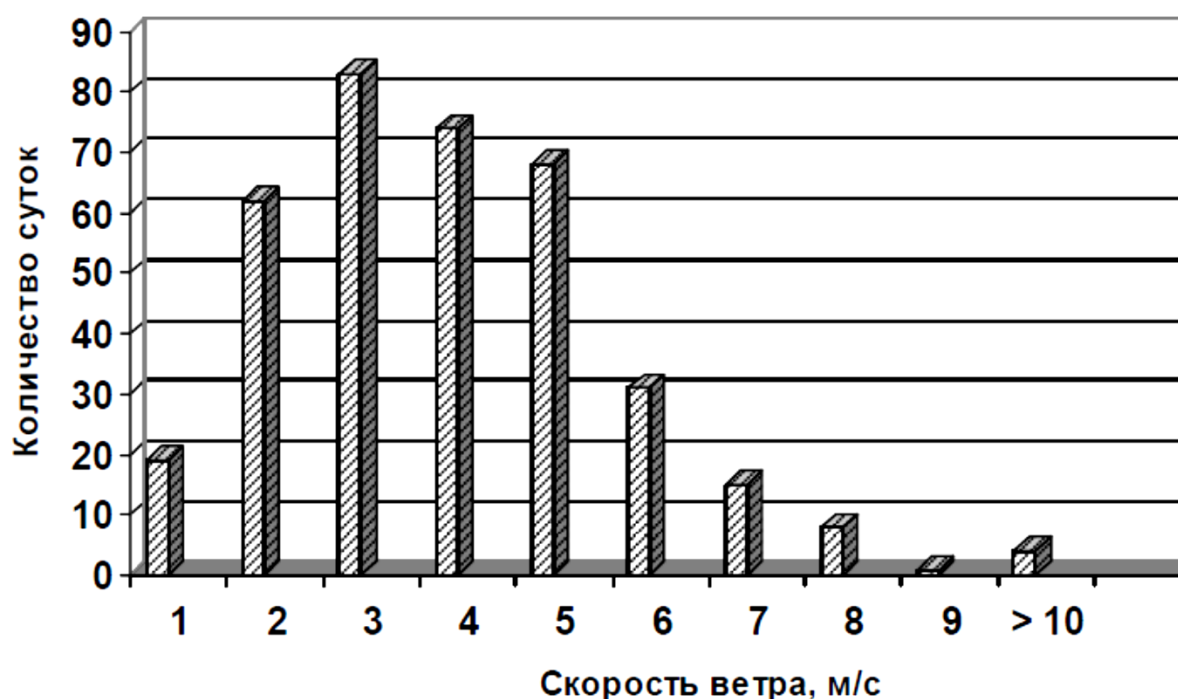


Рисунок 4- Распределение скорости ветра [32]

Анализ показывает, что на большинстве территории РФ преобладает достаточно низкая (<6 м/с) скорость ветра, характерна суточная цикличность.

В безветренную погоду скорость распространения пожара составляет приблизительно 0,2-0,6 м/мин (в зависимости от вида и плотности пожарной нагрузки), до 2-10 м/мин - при скорости ветра более 6 м/с. Особенно негативное влияние оказывает ветер при лесных верховых пожарах, где скорость распространения пожара может достигать сотен метров в минуту (рис. 5) [32].

Влажность и температура воздуха в большей степени влияют на процесс зарождения горения. Несмотря на то, что влажность воздуха и его температура жёстко связаны между собой, рассмотрим изначально механизмы воздействия на них по отдельности. Повышение влажности существенно затрудняет процесс возникновения горения (рис. 6) [32].



Рисунок 5 – Влияние скорости ветра на скорость распространения в зависимости от вида пожарной нагрузки: 1- пожар в степи, 2- лесной низовой пожар, 3 – лесной верховой пожар [32]

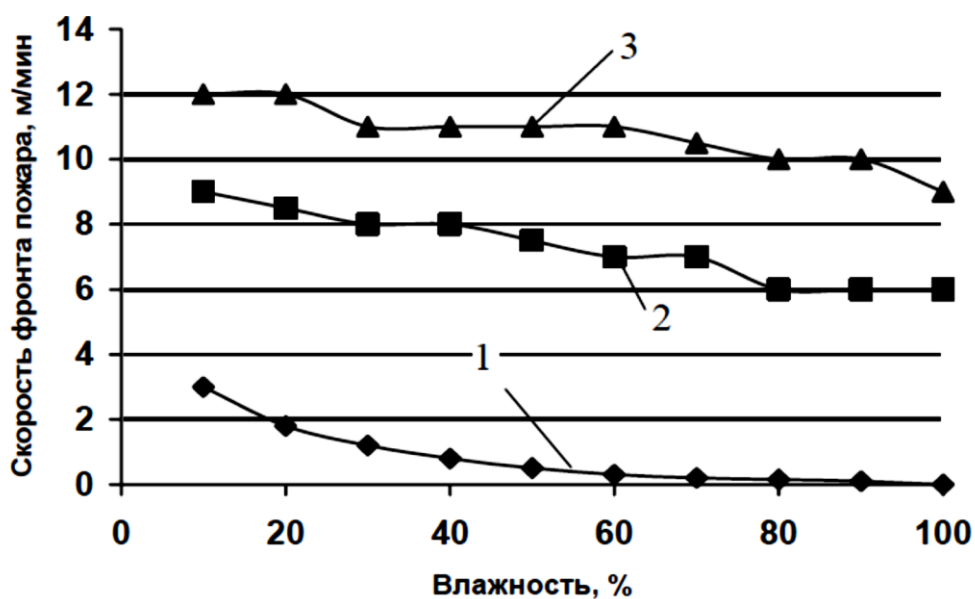


Рисунок 6 – Влияние влажности воздуха на скорость распространения лесного низового пожара на различных этапах горения: 1 – 0-10 мин; 2 – 10-30 мин; 3 - > 30 мин [32]

На развитый пожар (после 10 мин активного горения) влияние температуры и влажности воздуха имеет несущественное влияние, поэтому силы и средства, затраченные на снижение температуры и повышение влажности в это время уже не оправдывают себя.

Исследования среднесуточного распределение влажности (рис. 7) [8] показывают следующее:

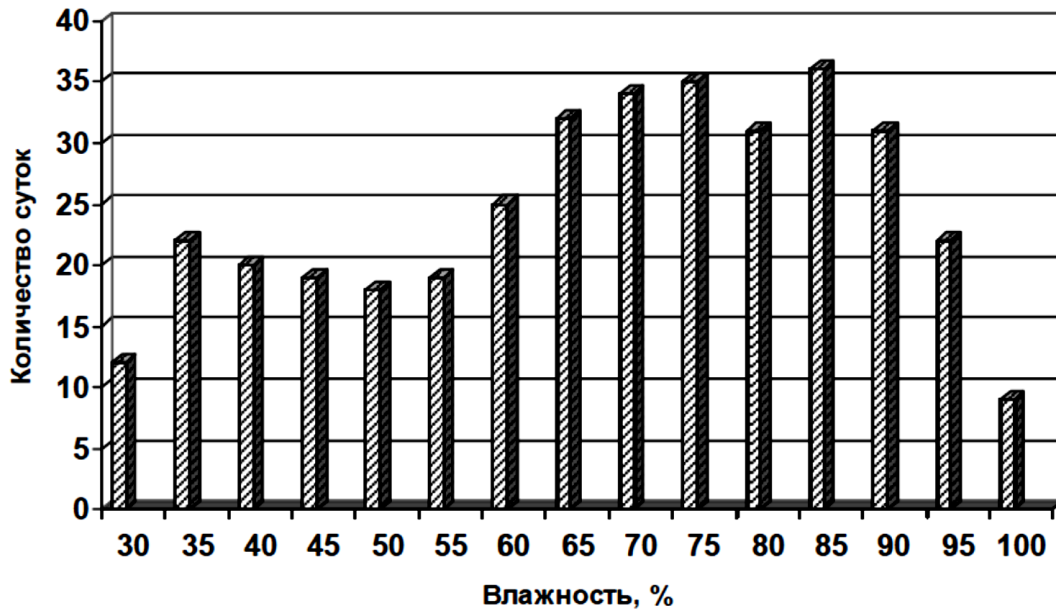


Рисунок 7 - Среднесуточное распределение влажности за 2010 год [ 32]

Как показывает анализ, основным засушливым периодом в регионе восточной Европы является летний период, который и характеризуется подавляющим количеством природных пожаров, по сравнению с остальными сезонами (рис. 8).

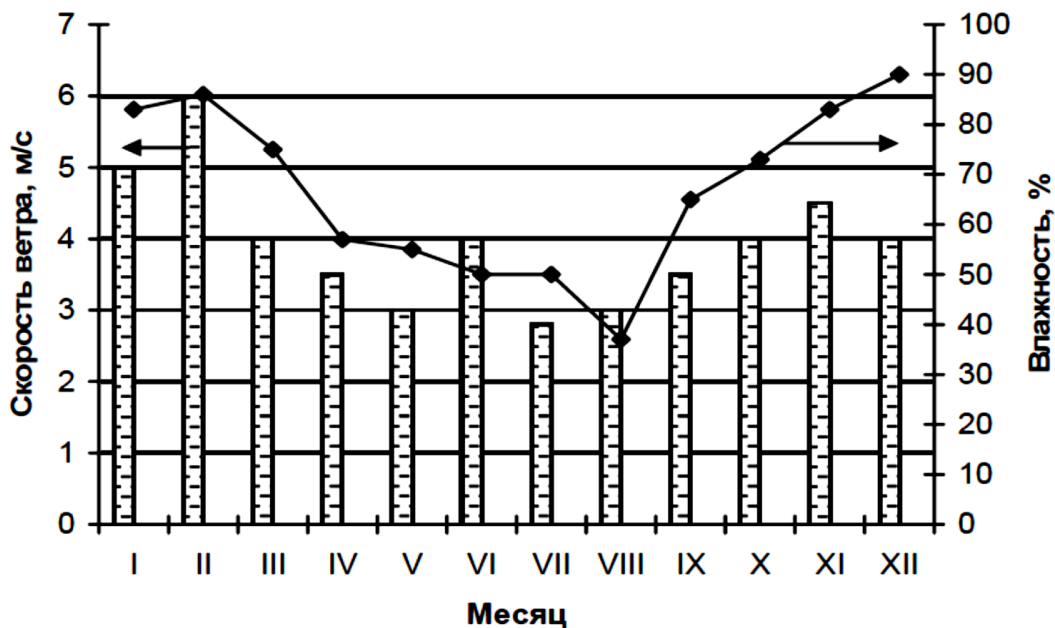


Рисунок 8 – Распределение влажности и скорости ветра по месяцам [32]

Из рисунка 8 видно, что в некоторые периоды, при высокой скорости ветра, сохраняется достаточно влажная погода и наоборот - засушливые периоды характеризуются низкой скоростью ветра.

Снижение температуры также влияет на процессы зарождения пожара – рисунок 9.

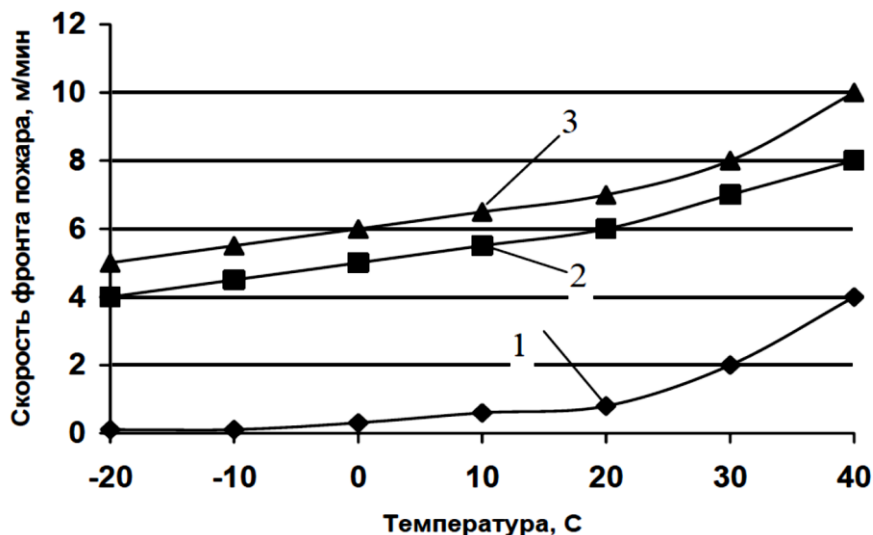


Рисунок 9 – Влияние температуры окружающей среды на скорость распространения лесного низового пожара на различных этапах горения: 1-10 мин; 2- 10-30 мин, 3 >30 мин [32]

На рисунке 10 представлены результаты исследований по скорости распространения фронта пламени и увеличению охватываемой пожаром площади. При влажности напочвенного покрова 25 % с течением времени площадь пожара перестает существенно изменяться.

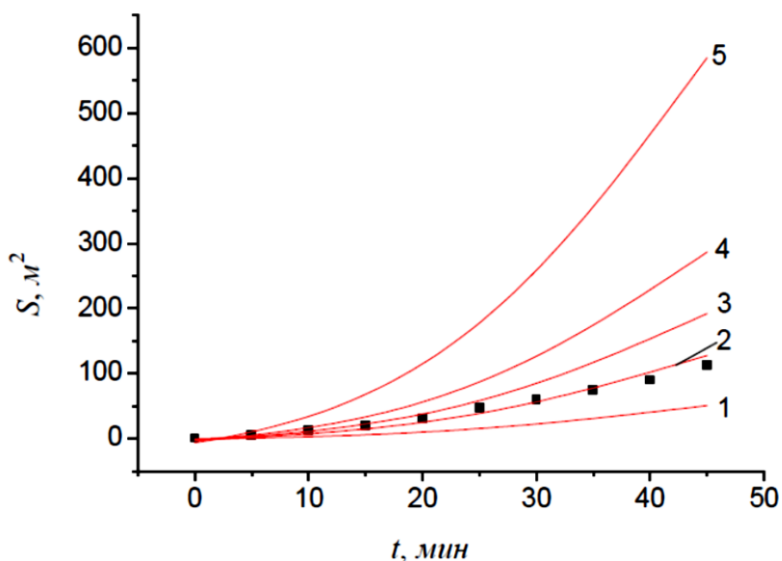


Рисунок 10 - Зависимость площади пожара от времени горения при температуре окружающей среды 21 °С, скорости ветра 1 м/с, запасе ЛГМ 1,4 кг/м<sup>2</sup> для уровней влажности ЛГМ, %: 25 (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4), 5 (5) [10]

Можно предположить, что дальнейшее увеличение влажности материала приведет к полному прекращению горения даже при длительном воздействии на него тепловой энергии.

#### **4 ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПРИ ТУШЕНИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ. СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ТУШЕНИЯ**

В настоящее время наиболее распространенными способами тушения лесных пожаров являются захлестывание кромки, тушение грунтом, водой, химикатами, а также удаление горючих материалов с помощью отжига, взрыва или механическими средствами, табл. 8.

Таблица 8–Схема прекращения горения

Элементы горения	Направление воздействия на горение	Способы борьбы	Результат
Кислород воздуха	Ограничение доступа кислорода	Захлестывание, засыпка грунтом	Прекращение горения
Высокая температура	Снижение температуры	Полив водой и растворами химикатов	Охлаждение и увлажнение
Горючие материалы	Изоляция или удаление горючих материалов	Применение химикатов, разделение противопожарными полосами, выжигание	Нейтрализация (невозгорание) или уничтожение горючих материалов

Работы лесных пожарных при проведении противопожарных мероприятий установлены в зависимости от класса пожарной опасности по условиям погоды и многие выполняются с использованием передвижной малой мобильной техники. На основе наблюдений был определён объём мероприятий который может провести личный состав, проводящий патрулирование лесных участков.

#### **Мероприятия, которые проводит личный состав патрулирующий лесной массив:**

- Обустройство мест для разведения отдыхающими костра;
- Дотушивание непогашенных отдыхающими костров;
- Определение мест, где находятся отдыхающие, разводящие костры, с учётом этих данных составляется маршрут патрулирования;

- Своевременное обнаружение горения и его ликвидация;
- Своевременное информирование диспетчера об оперативной обстановке и месте возникновения ЧС.

Основными средствами и способами тушения пожаров являются вода, водные растворы химически активных веществ, солей, аэрозоли, ударные и взрывные волны, газовые струи, прокладка профилактических полос и т. д [13]. Для каждого способа тушения существуют основные механизмы прекращения горения.

Все методы локализации и тушения лесных пожаров можно разделить на две категории:

- непосредственно воздействующие на фронт пожара;
- направленные на локализацию зоны горения.

Классификации способов тушения лесных пожаров приведена на рисунке 11.

#### **4.1 Способы тушения, непосредственно воздействующие на фронт пожара**

Способы тушения лесных пожаров, непосредственно воздействующие на фронт пожара наиболее распространены. Их принцип основан на воздействии и разрушении структуры фронта пожара.

Способы тушения, непосредственно воздействующие на фронт пожара, подразделяются по механизму тушения на две основные группы:

- механического воздействия;
- физико - химического воздействия.

К первой группе можно отнести способы, в которых прекращение горения происходит в результате сдува продуктов газификации из зоны пиролиза, благодаря чему уменьшается концентрация горючих газов и кислорода воздуха в зоне пиролиза и соответственно прекращается пламенное горение. По длительности действия: импульсного и непрерывного воздействия. К способам тушения импульсного воздействия относятся:

- мгновенный выпуск инертных газов в зоне горения;
- захлёстывание кромки свежесрубленными ветками;
- взрыв зарядов перед фронтом лесного пожара;
- метание во фронт пожара противопожарных снарядов.

Метод «захлёстывания» свежесрубленными ветками деревьев применяется для тушения низовых пожаров. При этом происходит срыв пламени и понижение концентраций горючих газов, охлаждение зоны горения. Способ эффективен при тушении низовых пожаров, является доступным и простым. Но при тушении крупных пожаров использование данного способа не эффективно.

Запатентовано устройство [66], позволяющее использовать ударные волны, создаваемые паром. Устройство представляет собой ёмкость с жидкостью. Ее доставляется в зону горения и под воздействием температуры горения



происходит парообразование. При достижении критического уровня давления происходит мгновенное освобождение паров, срыв пламени и разбавление горючих газов и кислорода инертным газом, а также увлажнение лесных горючих материалов.

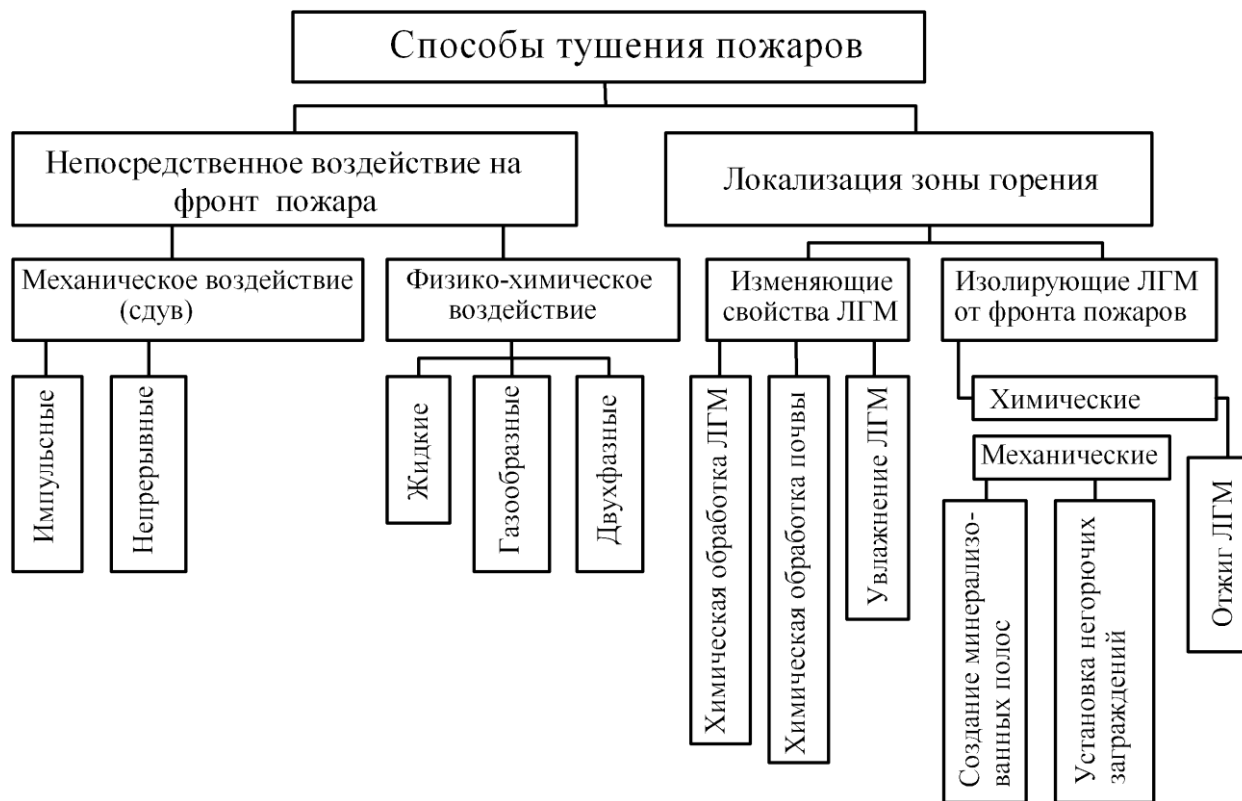


Рисунок 11 –Способы тушения природных пожаров

В некоторых изобретениях [57-60, 70] предлагается использовать противопожарные бомбы, снаряды. В [55] запатентовано устройство, позволяющее в качестве средства доставки использовать стрелковое или артиллерийское оружие. Подобные конструкции не получили распространения из-за низкой эффективности и небезопасности.

Представляют интерес устройства, позволяющие осуществлять длительное воздействие на структуру фронта пожара. Запатентовано устройство [63], с помощью которого предлагается использовать турбореактивный двигатель для генерации нейтрального газа, воздействующего на структуру фронта пожара и механически сдувающего пламя и понижающего концентрацию горючих газов и кислорода.

Для повышения эффективности был разработан способ [71], предусматривающий введение огнегасительной жидкости в распыленном виде в газовый поток. При этом повышается теплоотвод из зоны горения и происходит механический сдвиг горючих продуктов пиролиза.

Вторая группа (физико-химического воздействия). Производит разбавление продуктов пиролиза до негорючих концентраций, химическое торможение

процессов горения, увеличение объёмного и тепло-массообмена элементов лесных горючих материалов и окружающей среды.

Эту группу способов также можно разделить на подгруппы в зависимости от агрегатного состояния применяемых огнетушащих веществ:

- Жидкие.
- Газообразные.
- Двухфазные.

Способы тушения жидкими огнетушащими веществами нашли широкое применение из-за доступности и низкой стоимости огнетушащих веществ. Наиболее широко используются вода и её растворы. Вода обладает значительной теплоёмкостью (4,19 кДж/кг), большой теплотой парообразования (2260 кДж/кг), химической нейтральностью.

Компактная струя воды, попадая в зону горения, оказывает охлаждающее воздействие на зону пиролиза, разбавляет горючие газы, повышает влагосодержание ЛГМ.

Известно, что при испарении воды объём образовавшегося пара в 1700 раз больше объёма самой испарившейся воды. При подаче компактных струй роль пара в прекращении горения незначительна. В данном случае основную роль в пожаротушении играет охлаждение зоны горения.

Тушение водой лесных пожаров является не самым эффективным способом из-за высокой интенсивности подачи воды. Тем не менее, способ остаётся наиболее простым и распространённым.

Для повышения огнетушащей эффективности в воду вводят добавки, повышающие смачивающую способность или вязкость.

Был разработан способ [49], предусматривающий последовательное применение раствора поверхностно-активного вещества, а затем воды с гелеобразующей добавкой. Вода при нагревании выделяется и тушит пламя. В результате чего повышается влагосодержание, что приводит к прекращению горения.

Огнетушащую эффективность воды можно увеличить, если подавать её в очаг пожара в распылённом виде [52]. При этом дальность действия уменьшится, но поверхность орошения увеличится.

При подаче воды распылёнными струями тушения пожара происходит за счет интенсивного парообразования, в результате чего снижается температура в зоне горения и уменьшается концентрация горючих компонентов газовой смеси.

Еще один способ увеличения огнетушащей способности распылённой воды достигается путём подачи смеси воды и соли в виде аэрозолей [69]. Вода испаряется и происходит выделение свободной соли, интенсивно тормозящей процессы горения.

Одним из интересных и перспективных способов тушения является импульсная подача распылённых струй. Данный способ подачи ещё больше усиливает огнетушащее действие распылённой воды.

Российский вариант устройства представлен в виде ранцевого огнетушителя [72]. Устройство представляет собой ранцевый бак, шланг, расходную ёмкость

с подвижным поршнем, струйную форсунку, а также пороховые аккумуляторы давления со средствами инициирования. По оси форсунки на направляющей закреплён дефлектор, с помощью которого обеспечивается дробление струи. Такой способ подачи увеличивает проникающую способность распылённой жидкости во фронте пожара, чем достигается большая эффективность и экономичность.

Известен метод повышения эффективности тушения пожара распыленной водой [62]. Сокращение времени тушения достигается тем, что в процессе тушения очага горения по мере уменьшения сил напора пламени (за счет уменьшения его тепловой мощности) и площади горения (за счет более интенсивного подавления пламени периферийных участков поверхности горения) производится одновременное последовательное (соразмерное) уменьшение телесного угла факела распыла и увеличения дисперсности по всему сечению струи.

Это позволяет увеличивать огнетушащую эффективность воды в центральной части и тем самым сокращать общее время тушения.

В течение всего периода тушения очага пожара 1 по мере уменьшения поверхности горения 2 соответственно сил сопротивления пламени и горячих газов 5 распыленную струю создают с увеличивающейся во времени дисперсностью, т.е. с уменьшающейся кинетической энергией движения капель 4, сохраняя при этом закон переменной дисперсности по сечению струи, и подачу на очаг пожара осуществляют с уменьшением телесного угла факела распыленной воды  $\varphi$ , рис. 12.

При этом поверхность горения 2 орошается равномерно, но с непрерывно увеличивающейся массой воды 6. В результате достигается существенное сокращение общего времени тушения пожара как за счет увеличивающейся огнетушащей эффективности воды благодаря увеличению дисперсности, так и за счет увеличения интенсивности охлаждения горячей поверхности благодаря увеличению массы воды 6 на единицу орошаемой поверхности.

Способ тушения является наиболее рациональным, так как обеспечивает соответствие степени необходимого размельчения капель воды физическим силам сопротивления очага горения и исключение подачи воды на уже потушенные участки.

Практическим устройством служит устройство, создаваемое на основе усовершенствования насадки-распылителя для пожарного ствола, позволяющее изменять в процессе тушения дисперсность по сечению струи и угол факела ее раскрытия. При использовании данного способа распыленной водой с изменяющейся дисперсностью в пределах от 1 до 0,1 мм время тушения очага пожара сокращается в 5-10 раз. Увеличивающийся при этом удельный расход воды на единицу поверхности горения также способствует времени тушения.

Было разработано импульсное устройство пожаротушения [65], где подача огнетушащего вещества происходит высокоскоростными импульсными «выстрелами» из ствола специального «водомёта» или «водяной пушки», работающей под давлением 2,5-5,0 МПа, подавая воду со скоростью 120-150 м/с. Вода распыляется на капли среднего размера 50-100 мкм.

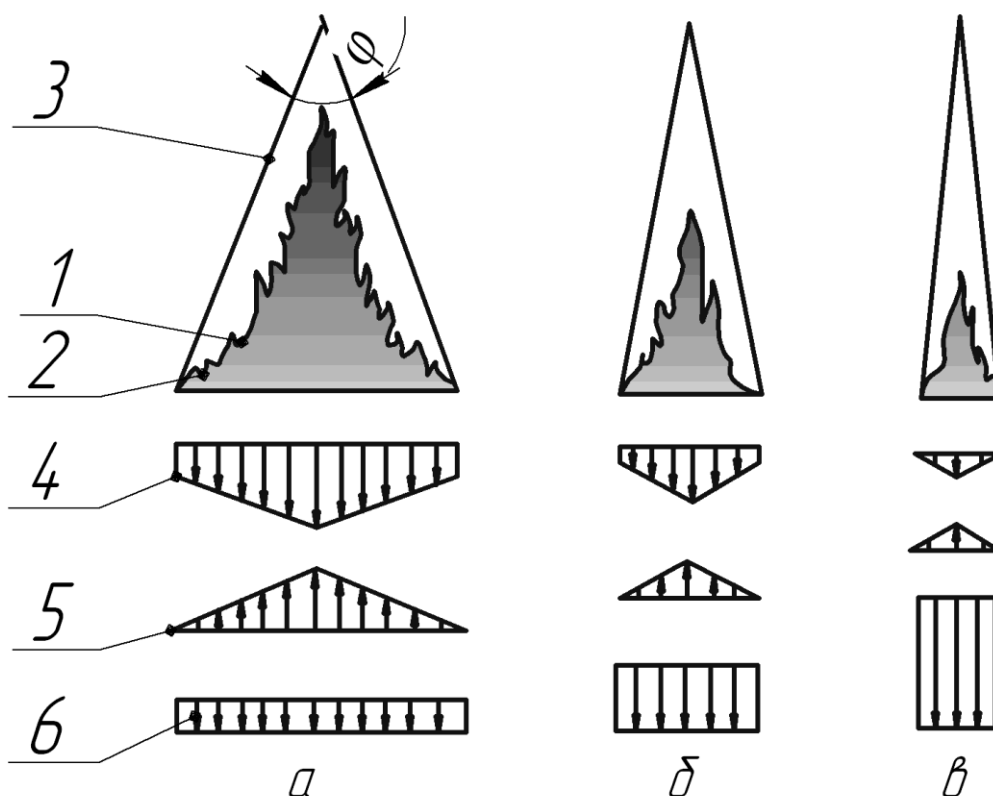


Рисунок 12 – Повышение эффективности тушения уменьшением угла распыла в процессе тушения

Широкое применение нашли способы тушения горючих материалов двухфазными струями. Они позволяют эффективно воздействовать на зону горения с помощью малого количества огнетушащих веществ. Например, для тушения лесного низового пожара успешно применяется лесопожарная воздуходувка ВЛП-2,5, имеющая вентилятор и ёмкость с огнетушащим составом от ранцевых огнетушителей [9]. Применение воздуходувок эффективно при тушении пожаров с высотой пламени до 0,5 м и скоростью распространения до 3 м/мин.

Аналогичное назначение имеет воздуходувка-опрыскиватель противопожарная «Ангара» (рис. 13).

Еще один вариант получения огнетушащей струи в виде мелкодисперсного пароводяного аэрозоля заключается в подаче воды в высокотемпературный поток газов.

Для увеличения огнетушащей способности воды аэрозольного распыла было предложено устройство, позволяющее распылять перегретую воду и тем самым повышать плотность орошения по площади [45].

Известно устройство для получения газо-водяной струи на базе пожарного автомобиля [91]: напорный патрубок пожарного насоса соединён через смесительную камеру с выхлопной трубой двигателя пожарного автомобиля. Данное устройство позволяет значительно сэкономить огнетушащую жидкость.



Рисунок 13 – воздуходувка-опрыскиватель противопожарная «Ангара»  
 Тип двигателя 2-тактный. Рабочий объем 25 см<sup>3</sup>. Скорость воздушного потока – 90 м/с. Производительность – 731 м<sup>3</sup>/час. Емкость – 18л. Расход воды при полном газе – 1,8 л/мин. Масса – 6,6 кг.

Способы тушения лесных пожаров с помощью газов не нашли широкого применения из-за низкой эффективности. Газ, попадая в зону горения, быстро уносится конвективными потоками очага пожара, не достигая огнетушащих концентраций. Необходимо, чтобы вся зона горения была покрыта газом, не поддерживающим горение. Применение газового пожаротушения эффективно в начальных стадиях пожара, когда он ещё не распространился на большие площади.

Запатентованы способы тушения пожаров водяным паром [66] водяной пар, получаемый в парогенераторе, может подаваться в очаг пожара компактной или распылённой струёй. При этом пар может применяться вместе с огнетушащей жидкостью или с газовыми огнетушащими средствами.

Применение пара позволяют в значительной мере сэкономить жидкие огнетушащие вещества и после удаления пара лесные горючие материалы не поддерживают горение, пар обладает хорошей проникающей способностью, что позволяет тушить им в труднодоступных местах.

Т. о. способы физико-химического тушения с использованием двухфазных сред в настоящее время являются перспективными и наиболее экономичными, поскольку для получения огнетушащих двухфазных сред не требуется больших запасов огнетушащих веществ.

### **Способы тушения, направленные на локализацию зоны горения**

Способы тушения пожаров, направленные на локализацию зоны горения, также можно разделить на две основные группы:

- Способы тушения, изменяющие свойства ЛГМ.
- Способы тушения, изолирующие ЛГМ.

В первом случае создаются заградительные полосы из растительного покрова, не поддерживающего горения. Распространение лесного пожара прекращается при достижении лесных горючих материалов следующих условий распространения горения: повышение влагосодержания, химическое торможение горения ингибиторами, разбавление ЛГМ материалами, не поддерживающими горение, изменение тепло- и массообмена. Это может быть химическая обработка ЛГМ или почвы, увлажнение ЛГМ.

Основным способом химической обработки является нанесение на ЛГМ ретарданта [46]. Еще как вариант – разбрызгивания негоримых материалов, отвердевающих на воздухе [47]. При этом увеличивается влагосодержание конденсированной фазы в пологе леса и уменьшается прогрев лесных горючих материалов из-за образования на поверхностях лесных горючих материалов теплоизоляционных покрытий.

Одним из самых простых и распространённых способов локализации лесных низовых пожаров является распыление фосфатноамонийных солей при помощи ранцевых лесных опрыскивателей [72]. В данном случае реализуется предельное условие распространения лесного пожара по влагосодержанию лесных горючих материалов и соли, активно тормозят процессы горения. Недостатком этого способа является низкая надёжность из-за возможности прохода фронта пожара через обработанную полосу.

Эффективность заградительных полос, зависит не только от их ширины, но и от равномерности и степени пропитки горючих материалов.

Заградительные полосы должны устраиваться в местах с наименее развитым растительным покровом. Рекомендуемая при этом ширина полосы должна составлять один метр, а для захламливаемых участков и при скорости ветра под пологом леса более 3м/мин – два метра [79].

Срок действия защиты полос зависит от свойств жидкости, используемой для обработки горючих материалов.

Применяется несколько способов локализации лесных пожаров за счёт увеличения влагосодержания до предельных условий. Например, способ [87], воздействующий на кромку лесного пожара водяным паром. Пар обладает высокой проникающей способностью. Этим достигается разбавление горючих газов во всём объёме тушения с одновременным отводом тепла из зоны горения [87, 89].

Способ увлажнения лесных горючих материалов, повышающий предельные условия влагосодержания, можно использовать для создания заградительной полосы. Для этого размещают гибкую перфорированную трубу, соединённую с водоисточником. Подаваемая в рукав вода увеличивает теплоотвод из зоны горения, а образующийся пар разбавляет горючие газы. Для реализации этого способа требуется водоисточник, расположенный в непосредственной близости.

Интересен способ борьбы с лесными пожарами искусственно вызванными осадками. Недостатком является то, что его применение возможно только при наличии кучевых облаков перед фронтом лесного пожара.

Способы борьбы с лесными пожарами, изолирующие лесные горючие материалы от фронта пожара в настоящее время достаточно широко применяются. Основным принципом тушения здесь является понижение запаса лесных горючих материалов до критических значений. К этой группе относятся:

- создание минерализованной полосы ручным или механизированным способом;
- прокладка заградительной полосы;
- отжиг растительности в направлении фронта пожара.

Для устройства заградительных минерализованных полос могут применяться тракторные плуги ПЛ-70, ПЛП-135, бульдозеры, почвообрабатывающие орудия пожарной цистерны АЦЛ-147 и пожарного вездехода ВПЛ-149, плуги, взрывчатые вещества и др [91-92].

Хорошо известен способ борьбы с пожарами с помощью отжига лесных горючих материалов, сущность которого заключается в выжигании горючих напочвенных материалов перед кромкой пожаров, в результате чего образуется минерализованная полоса из конденсированного продукта горения.

Известен зажигательный аппарат АЗ-4 (рис. 14) применяется для поджигания напочвенного покрова и подстилки при борьбе с лесными пожарами методом пуска встречного огня или проведении отжига от опорной полосы, а также сжигания порубочных остатков при огневой очистке вырубок, проведении сельхозпалов и регулируемых выжиганий.



Рисунок 14 – Зажигательный аппарат АЗ-4

Ширина выжженной полосы должна быть порядка 100-150 метров. Искусственные опорные полосы могут быть созданы из несгораемого материала, слоя пены, растворов огнетушащих химикатов или шнуровыми зарядами взрывчатого вещества [13]. Недостатком такого способа является низкая оперативность, экологическая небезопасность.

## 4.2 Ранцевые огнетушители

Наиболее простыми и распространенными устройствами для тушения лесных пожаров являются ручные ранцевые огнетушители, при помощи которых огонь непосредственно тушится или путем создания заградительных полос химическим раствором. Конструкция ранцевого огнетушителя обеспечивает мобильность пожарного, что очень важно при локализации и ликвидации пожара в лесном массиве и позволяет регулировать струю огнетушащего вещества, в зависимости от ситуации, то есть струя может быть как компактной и достигать восьми или девяти метров, так и распыленной, достигая в длину до трех с половиной метров.

Широко используется при тушении низовых лесных пожаров ранцевый огнетушитель «Ермак» (рис.15). Конструктивно огнетушащее устройство «Ермак» представляет собой емкость, помещенную в специальный чехол с заплечными регулируемыми лямками. Для обеспечения защиты области спины от переохлаждения, ранец оборудован термоизолирующей подкладкой [73].



Рисунок 15–Ранцевый огнетушитель «Ермак»



Ранцевый огнетушитель «Ермак» бывает двух видов:

– Ранцевый огнетушитель (РП-15) «Ермак». Емкость для воды вмещает не более пятнадцати литров. Габариты РП-15 – 330х470х145 мм. Выброс распыленной струи составляет три с половиной метра, выброс компактной струи составляет восемь с половиной метров. Вес заряженного устройства не превышает семнадцати с половиной килограммов.

– Ранцевый огнетушитель (РП-18) «Ермак». Емкости для воды вмещает не более восемнадцати литров. Габариты РП-18 – 520х360х160 мм. Выброс струи огнетушащего состава осуществляется на расстояние 10-12 метров. Вес заряженного устройства не превышает двадцати с половиной килограммов.

Ранцевый лесной огнетушитель ОР-1(рис. 16) применяется для локализации пожара, оборудования заградительных полос водой или пеной. Вместительность ОР-1 составляет восемнадцать литров. Вес огнетушителя не превышает двух с половиной килограмм, масса гидропульта не превышает полутора килограмм. Длина гидропульта, как правило, составляет 650 мм.



Рисунок 16– Ранцевый огнетушитель ОР-1

Огнетушитель ранцевый лесной РЛО-К [76]. Выброс распыленной струи составляет три с половиной метра, выброс компактной струи составляет восемь с половиной метров. Область захвата распыленной струи огнетушащего состава не превышает 1,2 метров. Габариты РЛО-К – 520x360x160 мм.

Огнетушитель ранцевый лесной РЛО-М (рис. 17) [76]. Емкость для воды вмещает восемнадцать литров. Габариты РЛО-М – 520x360x160 мм. Область захвата распыленной струи огнетушащего состава не превышает 1,2 метров.



Рисунок 17 – Ранцевый огнетушитель РЛО-М

Ранцевый огнетушитель «Игла» (рис. 18) [76] используется для подавления локальных очагов пожара на открытых пространствах. Заряжается огнетушитель водой, либо пенообразующим составом на водной основе. Объем емкости под огнетушащее вещество составляет двенадцать литров. Габариты ранцевого огнетушителя «Игла» – 600x450x300 мм. Комплект огнетушителя дополнительно может оснащаться дыхательной системой от аппарата АИР-98МИ. Выброс огнетушащего вещества может осуществляться на расстояние более десяти метров.

Ранцевый огнетушитель «Барьер» (рис. 19) [76] относится к огнетушителям переносного типа. Вместительность ранцевого огнетушителя «Барьер» составляет семнадцать литров. Габаритные размеры огнетушащего устройства – 425x260x180 мм. Выброс огнетушащего состава осуществляется на расстояние до 12-14 метров. Масса заряженного огнетушащего устройства не превышает семнадцати килограмм.



Рисунок 18– Ранцевые устройства пожаротушения РУПТ-1-04 «Игла»



Рисунок 19–Ранцевый огнетушитель «Барьер»

В комплект каждого ранцевого огнетушителя входит гидропульт, оборудованный насосом, предназначенный для отвода огнетушащего состава из емкости. Соединяется гидропульт с емкостью посредством гибкого шланга. С помощью гидропульта можно регулировать режим работы огнетушителя: режим работы с компактной струей и режим работы с распыленной струей. Дополнительно на гидропульте можно закрепить специальную насадку, обеспечивающую пенную струю.

Новая разработка моторизированный пожарный ранец предназначен для тушения лесных пожаров мелкодисперсной струей огнетушащего состава под давлением, для прокладки опорных полос из пены средней кратности (рис. 20).



Рисунок 20 – Моторизированный пожарный ранец

Производительность составляет 3,7 л/мин при давлении струи от 25 атм. Мощность – 1,2 л.с. Объем двигателя 25,4 см<sup>3</sup>. Расход жидкости – 3,7 л/мин. Объем эластичного резервуара – 18 л. Максимальное давление 2,5-3,0 МПа. Масса 8,5 кг. Габаритные размеры: 300х320х600 мм (в рабочем положении) и 300х320х360 мм (в транспортном положении). К недостаткам можно отнести значительный вес и стоимость [76].

Т. о. весьма актуальным является совершенствование способов и технических средств для тушения лесных низовых пожаров.

### **4.3 Анализ веществ повышающих эффективность тушения лесных пожаров**

Одна из основных проблем – повышение эффективности использования воды при тушении пожаров. Практически все проводимые в настоящее время исследования по улучшению огнетушащих свойств воды могут быть сведены к двум направлениям.

Первое – улучшение текучести воды и улучшение ее смачивающих свойств.

Второе – уменьшение размера капель воды (получение «водяного тумана»), используемых при пожаротушении, до размеров, при которых происходит их полное испарение в очаге пожара. Реализация этих двух направлений выражается в совершенствовании распылителей воды пожарных стволов и в использовании добавок в воду, которые улучшают ее текучесть.

Для тушения лесных пожаров используют различные химические составы. Они подразделяются на смачивающие, огнезадерживающие (ретарданты) и огнегасящие.

Усиление огнегасящих свойств растворов по сравнению с водой происходит в основном за счет их более сильного охлаждающего действия. Растворами неорганических солей можно создавать заградительные полосы. Чистая вода испаряется быстрее, а растворенные в ней соли не только остаются сами, но и удерживают часть воды.

Из-за большой величины поверхностного натяжения вода плохо проникает в мелкие поры ЛГМ. Для повышения растекания ее по поверхности ЛГМ к ней добавляют поверхностно-активные вещества (смачиватели).

Из смачивающих химикатов наиболее известен сульфанола [80, 84]. В качестве поверхностно активных веществ (ПАВ) можно рекомендовать также различные моющие средства, а также смачиватели группы ОП-7, ОП-Ю и др. Водные растворы сульфанола зарекомендовали себя как эффективные средства борьбы с почвенными пожарами, особенно с торфяными.

Для этих же целей используют фосфорную кислоту, хлористый кальций, хлористый магний, сульфат аммония, аммофос и некоторые другие.

Фосфорную кислоту применяют в водных растворах концентрацией 15-25%. Эффективное средство, но применение ее ограничивается высокой стоимостью.

Хлористый кальций - обычно поставляется в плавленом виде в железных барабанах, массой 160-180 кгс концентрацией около 66%. Реже поставляют обезвоженный хлористый кальций - белый порошок, очень гигроскопичный, с содержанием 90% основного вещества.

Хлористый магний  $MgCl$  поставляется в железных барабанах, массой 300 кг с содержанием 45% основного вещества, остальное - кристаллизационная вода.

Сульфат аммония  $(NH_4)_2SO_4$  - порошок, используемый для удобрения. Поставляется в бумажных мешках. Содержание основного вещества 90-99%.

Аммофос (смесь аммонийфосфата  $(NH_4H_2PO_4)$  и диаммонийфосфата  $(NH_4)_2HPO_3$ ) - порошкообразное вещество, содержащее около 20% нерастворимых примесей.

Эффективность химикатов определяют как отношение расхода воды к раствору химиката на тушение при одинаковых условиях и с равным результатом. Для описанных выше химикатов коэффициент эффективности составляет от 1,2 - 1,5, т.е. 1 л химиката заменяет 1,2-1,5 л воды. С увеличением высоты пламени эффективность растворов несколько возрастает. При низком пламени (0,2 м) эффективность почти такая же, как у воды.

Дозировка раствора на опорных полосах в зависимости от мощности напочвенного покрова должна быть от 0,5 до 1,5 л на  $1 м^2$ . При необходимой продолжительности огнезадерживающего действия опорной полосы не более 1 ч достаточно применить раствор ПАВ (т.е. воду со смачиванием), а для обеспечения более длительного действия (до 24 ч) следует использовать 20 %-ный раствор хлористого кальция или хлористого магния с 0,5 %-ной добавкой смачивателя ОП-7.

При использовании автоцистерн для тушения водой со смачивателем для тушения низовых пожаров хорошо зарекомендовал себя 10%-ный раствор сульфанола или другого порошкового смачивателя, либо 30 %-ный раствор жидкого смачивателя (ОП-7), которые заливаются в бачок для пенообразователя.

Для улучшения текучести используют эффект «скользящей воды» при введении в воду полимерных соединений, в частности полиэтиленоксид или полиокс. При этом скорость течения воды увеличивается в 2,5 раза, а также улучшается смачивающая способность. К недостаткам можно отнести непродолжительность эффекта.

Сотые доли процента линейного полиакриламида действуют аналогичным образом. Практически реализовать способ удастся только для тех средств пожаротушения, которые используют заранее приготовленную и хранящуюся в специальных емкостях воду. Вода из внешнего водопровода (водопровода или водоема) не обеспечивает равномерное смешивание добавки с водой.

Известны исследования [84, 95] способа получения струй температурно-активированной воды, которая не только эффективно тушит пожары, но и резко снижает температуру пламени и осаждает дым.

Сущность способа заключается в том, что пресная вода вследствие нагревания ее до высоких температур под давлением изменяет свои свойства. После возвращения к обычным условиям вода находится некоторое время в так называемом метастабильном состоянии, проявляющемся в повышенной растворяющей способности карбонатов, сульфатов, силикатов и других соединений, в способности длительно удерживать в своем составе аномальные количества растворенного вещества и значительно повышать кислотность. Такая вода называется активированной.

Перегретой называют воду, которая, находясь в замкнутом объеме, при температуре более  $100^{\circ}\text{C}$  и при давлении больше атмосферного не вскипает и не переходит в пар. Если давление перегретой воды быстро уменьшается до атмосферного (перегретая вода выпускается из замкнутого объема в атмосферу), то происходит почти мгновенное вскипание воды. В результате вскипания одна часть перегретой воды переходит в пар, а другая часть дробится на капли диаметром менее 100 мкм, эти капли образуют «водяной туман». Диаметр капель «водяного тумана» составляет 10-50 мкм и витают в воздухе. Получение такого мелкого распыла возможно при давлении более 150 атм.

Наиболее эффективно струи ТАВ тушат пожары в замкнутых объемах, так как образуют большой объем «водяного тумана», который эффективно осаждает дым и пары ядовитых веществ, а также вытесняет воздух и тем самым уменьшает процентное содержание кислорода в зоне горения.

Эффективное (быстрое) уменьшение температуры при тушении ТАВ обеспечивается тем, что размер большинства капель «водяного тумана» составляет всего 10-50 мкм, а температура струи на расстоянии 30-50 см от ствола-распылителя перегретой воды  $-50-60^{\circ}\text{C}$ . Большая площадь поверхности капель и температура «водяного тумана», близкая к  $100^{\circ}\text{C}$ , обеспечивают быстрое испарение воды, что и понижает температуру в зоне горения, а также увеличивает объем пара.

Кроме того, эффективность пожаротушения струями ТАВ обеспечивается тем, что капли воды размером менее 50 мкм долго не осаживаются и вместе с конвективными потоками воздуха инжектируются в очаг пожара. Тактической возможностью пожаротушения является выбор оптимальных параметров «водяного тумана» за счет изменения температуры.

Регулирование температуры перегретой воды позволяет изменять соотношение между паровой и водяной фазой «водяного тумана», а также размер капель воды. При этом, при расходе около 1 л/с минимальный диаметр проточных частей не будет превышать 6-7 мм, а размер большинства капель воды будет составлять 10-20 мкм. Установка для перегретой воды работает от мощного электрогенератора (не менее 50кВт). Температура перегретой воды  $150-180^{\circ}\text{C}$  при расходе от 0,3 до 1,5л/с.

#### 4.4 Мобильные средства с активными рабочими органами для предотвращения и тушения лесных пожаров

Одним из самых простых, доступных, эффективных и не дорогостоящих способов предотвращения и тушения лесных пожаров является применение минерализованных (очищенных до минерального слоя почвы) полос (рис. 21) и опашки горящих очагов. Противопожарные разрывы и простые лесные дороги так же представляют хорошие преграды от распространения огня (рис. 22 а, б).

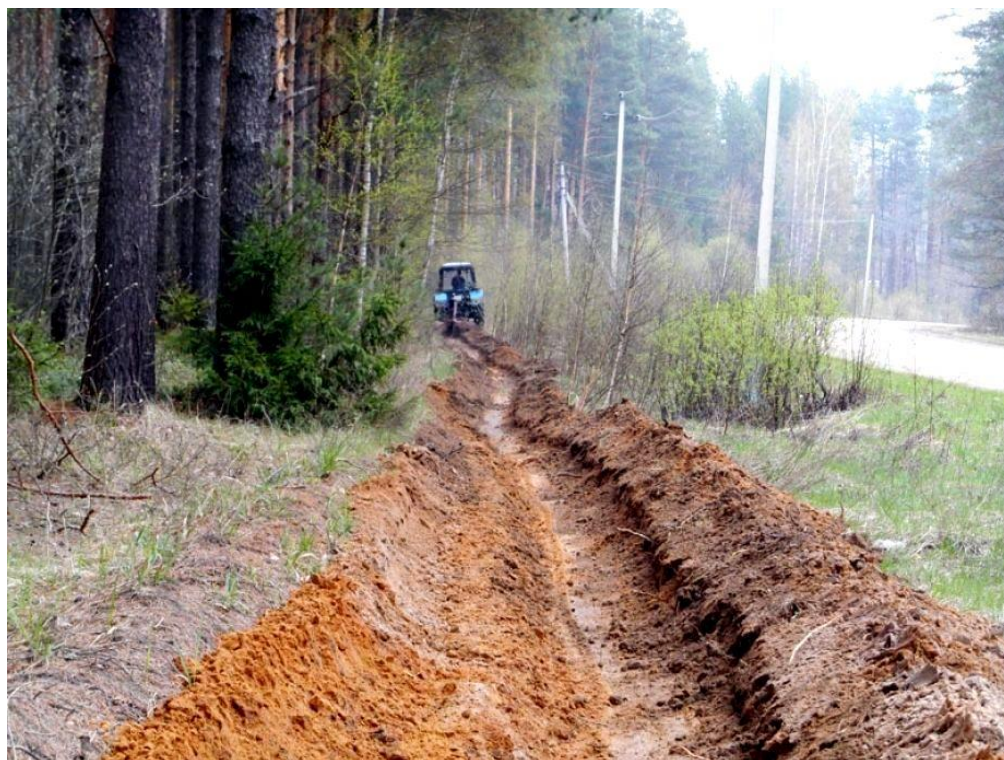


Рисунок 21 – Минерализованные полосы (общий вид)



Рисунок 22 – Лесная дорога, как эффективная преграда для распространения огня в лесу:

а – без травяного покрова, б – с травяным покровом незначительной высоты



Минерализованные полосы и неширокие противопожарные разрывы создают обычно пропашными и специальными лесными плугами с лемешными рабочими органами, а подновление осуществляют машинами и механизмами дисковыми рабочими органами (культиваторы, бороны и т.д.) [16].

Однако, в последнее время, все большее распространение получают механизмы с активными рабочими органами – фрезами, барабанами, грунтометательными лопатками и др. Подобные механизмы наиболее эффективны и удобны в условиях сильного задернения, а так же при наличии кустарника, порубочных остатков и захламленности на вырубках. Кроме того, они позволяют использовать грунт в качестве огнегасящего вещества при сбивании пламени. Это особенно актуально в условиях недостатка воды и труднодоступности лесных участков. Ниже представлен краткий обзор некоторых образцов данных машин.

**Агрегат лесопожарный фрезерный АЛФ-10** (рис. 23) – предназначен для прокладки заградительных и опорных минерализованных полос при борьбе, как с лесными, так и с прочими пожарами на поверхности грунта, а также создания и восстановления защитных минерализованных полос при противопожарном устройстве лесных, лесостепных и сельскохозяйственных территорий посредством фрезерования и метания грунта. Привод агрегата осуществляется от вала отбора мощности (ВОМ) трактора через карданную передачу. Тип рабочего органа – торцовая фреза. Дальность выброса грунта 1,5...13м. Ширина получаемой минерализованной полосы до 10м. Агрегируется с тракторами МТЗ-80/82, ДТ-75.

**Полосопрокладыватель ПФ-1** (рис. 24) – навесная машина для поперечного фрезерования и метания грунта. Используется для прокладки и подновления защитных противопожарных полос глубиной до 20 и шириной 70см (общая ширина защитной полосы до 10м), создания заградительных полос при локализации (тушении) лесного пожара. Рабочая скорость 1,3...3,2 км/ч.



Рисунок 23 – Агрегат лесопожарный фрезерный АЛФ-10

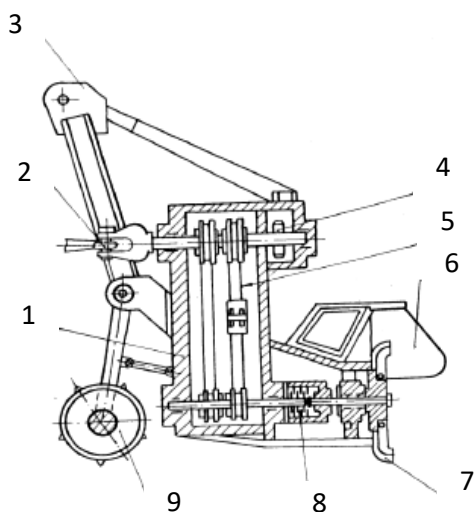
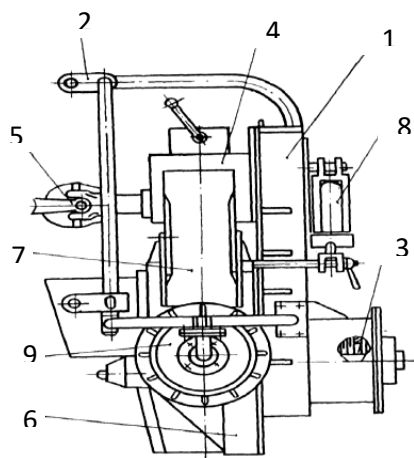


Рисунок 24 – Полосопрокладыватель ПФ-1:

1 - корпус, 2 - карданный вал, 3 - навесное устройство, 4 - раздаточный редуктор, 5 - передаточный механизм, 6 - защитный кожух, 7 - рабочий орган, 8 - предохранительная муфта, 9 - опорный каток



**Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель** (рис. 25), разработанный Воронежской государственной лесотехнической академии (патент РФ №2496540) – предназначен для тушения низовых пожаров грунтом, а также для прокладки защитных минерализованных полос в безводных массивах.

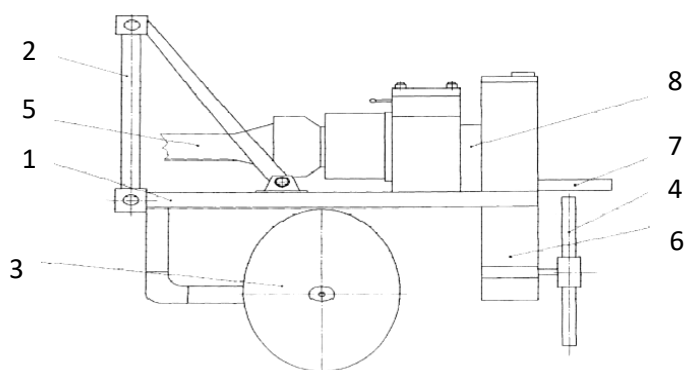


Рисунок 25 – Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель ВГЛТА:  
 1 - рама, 2 - навесное устройство, 3 - два сферических диска, 4 - фреза-метатель, 5 - карданный привод, 6 - трансмиссия с предохранительным устройством, 7 - направляющий кожух, 8 - редуктор-реверс.

Из современных самоходных (ручных) грунтометов, обладающих высокой эффективностью борьбы с лесными пожарами, можно выделить **малогабаритный мобильный грунтомет-полосопрокладыватель** (рис. 26). Он создан на базе снегоуборочной машины Chelmann мощностью 6,5л.с. и предназначен для прокладки минерализованной полосы по периметру лесных пожаров и тушения кромки путем выброса грунта на пламя с одновременной прокладкой минерализованной полосы.

Дальность выброса грунта не менее 1,5м, ширина минерализованной полосы не менее 0,2м. Рабочая скорость при тушении лесных пожаров не менее 0,8км/час. Принцип передвижения – самоходный. Обслуживается грунтомет оператором с помощником.



Рисунок 26 – Малогабаритный мобильный грунтомет-полосопрокладыватель

**Плуг-рыхлитель навесной ПРН-40** (рис. 27) служит для глубокой обработки почвы на склонах крутизной до 12°, а также для вспашки с оборотом верхнего слоя и глубокого рыхления без выноса на поверхность нижних слоев почвы.

Он состоит из следующих частей: рама с навесным устройством, дисковый нож, корпус с укороченным отвалом, ротационный рыхлитель с вертикальной осью вращения, карданная передача, рыхлительная лапа сбоку плужного корпуса, опорные колеса с механизмом регулирования глубины обработки.

Ротационные рыхлители приводятся в движение от ВОМ трактора через карданную передачу и редуктор.

Агрегатируется ПРН-40 с тракторами ДТ-75М, Т-4А.

Производительность за 1 ч основного времени составляет 3 км. Ширина захвата корпуса 40 см. Глубина вспашки – до 27 см. Рабочая скорость 2... 3 км/ч. Масса 900 кг.

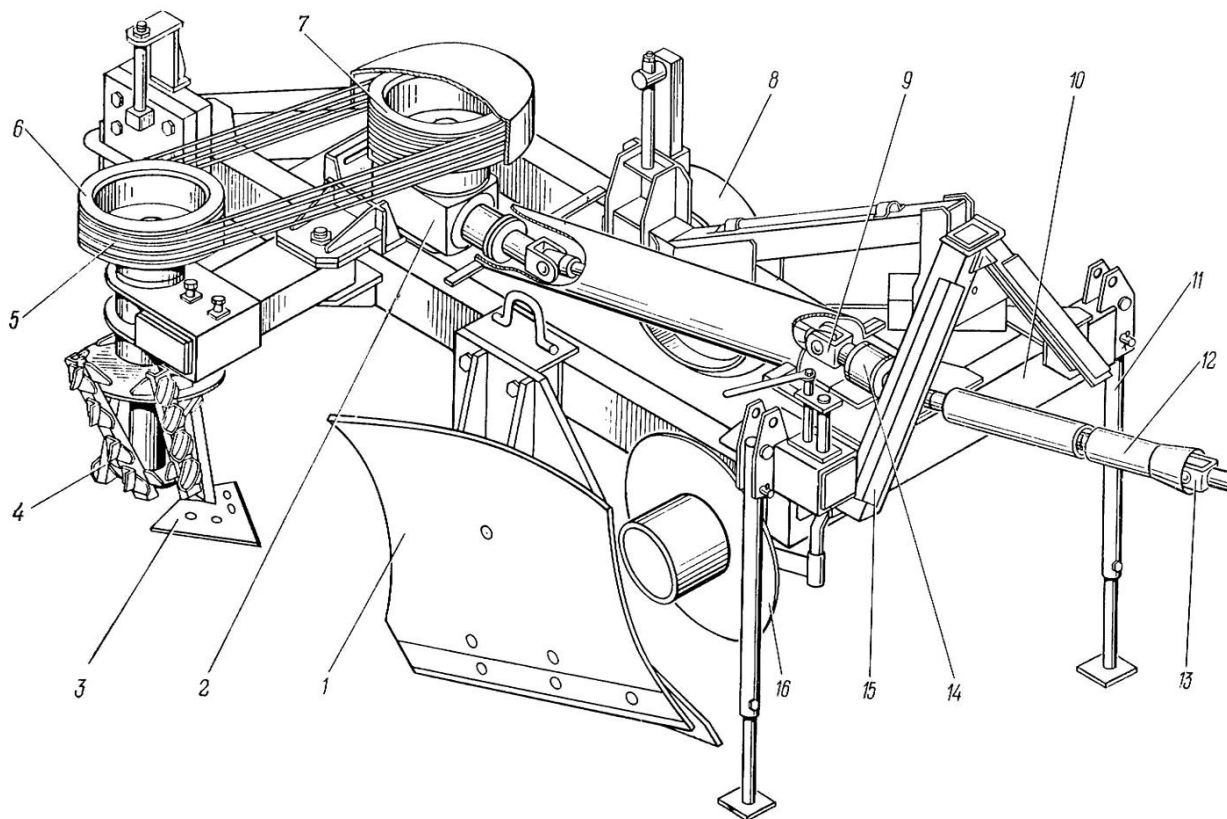


Рисунок 27 - Плуг-рыхлитель ПРН-40

1 - одноотвальный корпус; 2 - редуктор; 3 - рыхлительная лапа; 4 - ротационный рыхлитель; 5 - клиновой ремень; 6, 7 – шкивы; 8 - опорное колесо; 9 - промежуточный вал; 10 - рама; 11 – стойка опорная, 12 - карданный вал; 13 - вилка карданного вала; 14 - опора карданной передачи; 15 – автосцепка; 16 - дисковый нож

Технологический процесс выполняется следующим образом: корпус 1 подрезает пласт и поднимает его на 10...15 см от дна борозды, поворачивая при этом его на 90°. Пласт сходит с отвала и подвергается действию лопастей ротационного рыхлителя 2, которые крошат, доворачивают и отбрасывают его в сторону пашни, при чем в контакт с пластом первыми входят верхние лопасти, сбрасывающие задернелую часть на дно борозды, а нижние лопасти вторыми – вынося на поверхность нижнюю часть пласта.

Одновременно со вспашкой происходит глубокое рыхление подпахотного слоя рыхлителем 3 без перемешивания почвенных горизонтов. Ротационный плуг ПРН-40 имеет малую ширину захвата – 0,73 м, несмотря на высокое качество крошения (97...99%) и полную заделку пожнивных остатков (100%), удельные 29 энергозатраты (282 кВт·ч/га), что говорит о том, что разделение

потока мощности не обеспечивает реального сокращения удельных энергозатрат.

#### 4.5 Способы уменьшения расхода огнетушащих средств

Для уменьшения расхода огнетушащих средств, в частности воды можно выделить следующие основные направления:

- подбор огнетушащего вещества в зависимости от условий тушения и вида ЛГМ;
- оптимизация схем и режима тушения (скорость движения, параметров факела распыла, угла подачи жидкости, интенсивности, %-ного состава);
- применение двухфазных сред, тонкораспыленной или активированной воды, пара;
- увеличение смачивания поверхности.

Вышеперечисленные способы и механизмы имеют общие недостатки, которые снижают эффективность борьбы с лесными пожарами.

И первое – это отсутствие водоисточников в непосредственной близости с возникшими пожарами. Необходимо разрабатывать и совершенствовать методы тушения пожаров с минимальным расходом воды, огнетушащих средств или заменой их на распространенные и подручные средства, а также мероприятия, предотвращающие распространение и возникновение пожаров.

Согласно статье 53.1 Лесного кодекса РФ предупреждение лесных пожаров должно осуществляться мерами противопожарного обустройства лесов. Одна из мер – прокладка просек, противопожарных разрывов, устройство противопожарных минерализованных полос. Последняя мера очень эффективна не только для предупреждения, но и при тушении лесного пожара путем его локализации (статья 53.4 Лесного кодекса РФ). Кроме того Правилами пожарной безопасности в лесах пунктами 10б, 12, 13а, 19, 20, 21, 22в, 23а, 23б, 27, 33а, 34 предписана обязательная прокладка противопожарных минерализованных полос или противопожарная опашка шириной от 0,5 до 5 метров.

Наиболее универсальным и эффективным средством для прокладки противопожарных минерализованных полос и тушения кромки низовых пожаров являются пожарные полосопрокладывающие и грунтометательные машины, агрегируемые тракторами. В России имеется несколько эффективных конструкций данных механизмов.

Проанализированные орудия хорошо работают только на легких песчаных или супесчаных незадернелых почвах, без каменистых и прочих (пни, корни, порубочные остатки) включений.

Рабочая скорость всех образцов не превышает 1,5-2,5 км/час, что при тушении лесных пожаров (особенно в лесостепной зоне) часто бывает недостаточно.

Отдельные механизмы (например пожарный грунтомет-полосопрокладыватель ВГЛТА), благодаря своей конструкции, могут работать в сложных почвенных условиях (насаждения, вырубki, гари), но при встрече с препятствиями (ямы, крупные

корни, пни, валежник, порубочные остатки) должны обходить их. В этих случаях требуется предварительная полосная расчистка с применением дополнительных механизмов и специализированного оборудования.

Еще одна специфика данных механизмов – это возможность их перемещения только по открытым участкам леса (опушки, внутриквартальные просеки, лесные дороги) или в условиях редколесья. Под пологом леса работа возможна только совместно с бульдозером или кусторезом.

При рабочем движении по мелкому кустарнику и подросту или задернелым участкам леса с толстой подстилкой, рабочие органы грунтометов быстро забиваются даже мелкими ветвями и корнями. Глубина захвата грунта при этом существенно уменьшается. Количество выбрасываемого грунта становится недостаточным для тушения кромки огня или надежного покрытия травы, невысокого кустарника и лесной подстилки, т.е. толщина грунта не сдерживает перемещения наземного пожара.

Проведя анализ основных современных конструкций пожарных грунтометов и полосопрокладывателей, использующихся для предотвращения и тушения лесных пожаров, можно сделать выводы о том, что данные механизмы требуют дальнейшего усовершенствования.

Одним из перспективных направлений можно считать повышение эффективности работы в условиях сильно уплотненных и высокоздернелых почв, насыщенных корнями древесно-кустарниковой растительности и порубочными остатками.

Данное направление должно касаться улучшения работы органов, отвечающих за предварительную подготовку полосы почвы, и органов способствующих эффективному (дальность, равномерность и толщина покрытия и др.) разбрасыванию грунта с данной полосы. Второе перспективное направление – это возможность прокладки пожарными грунтометами минерализованных полос (в том числе при локализации пожаров) под пологом леса и на площадях с густым подлеском или плотным кустарником.

Реализация этого направления возможна путем применения дополнительных устройств, рабочих органов или отдельного комплекса машин для удаления (уничтожения) нежелательной растительности.

## **5 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ, ДВУХФАЗНЫХ СРЕД (ВОДЯНОЙ ПАР-ВОДА) И ПАРА В КАЧЕСТВЕ ОГНЕТУШАЩИХ СРЕДСТВ**

### **5.1 Распыленная вода**

Наиболее широко для тушения лесных пожаров используется вода и её растворы. Вода обладает значительной теплоёмкостью, теплотой парообразования и химической нейтральностью.

Огнетушащую эффективность воды и водных растворов можно увеличить, подавая её в очаг пожара в распылённом виде.

Распыленную в воздухе воду в первом приближении можно считать затопленной воздушной струей с примесью водяных частиц. Затопленные струи подробно исследованы экспериментально и теоретически. При наличии в составе струи примеси к основному веществу можно выполнить расчет ее пространственного распределения на основе теории затопленных струй. Главный критерий применимости такого метода – достаточная степень дисперсности воды, т.е. малый размер капель.

Начальный участок струи состоит из ядра с постоянным значением продольной скорости  $u_0$  и пограничным слоем, в котором продольная скорость меняется от  $u_0$  в ядре до нуля на внешней границе струи (рис. 28).

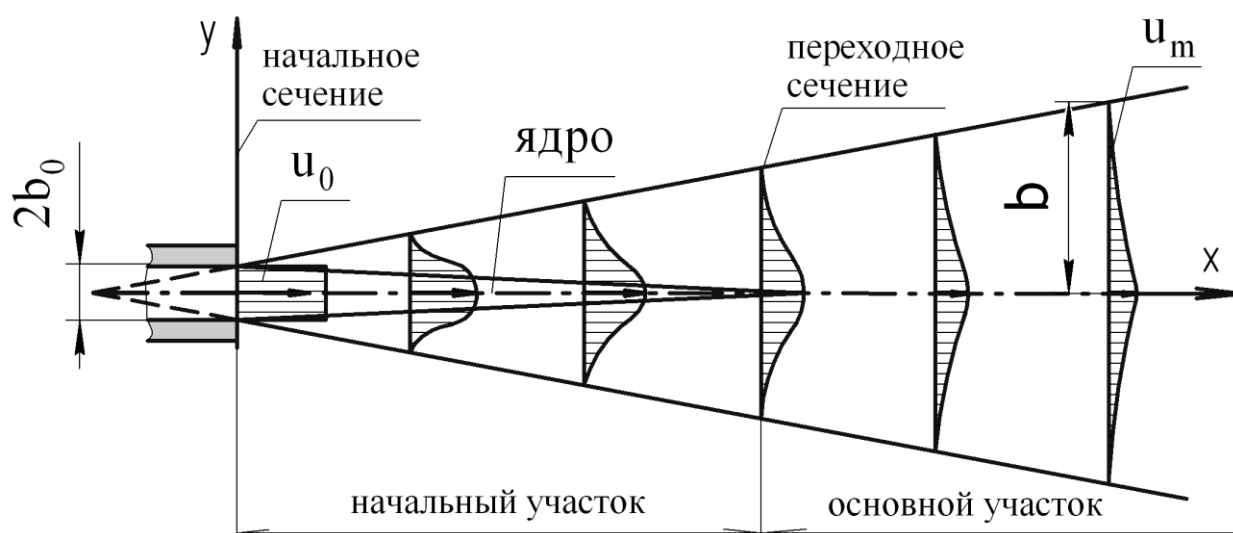


Рисунок 28 - Расчетная схема

Вдоль по потоку ядро утончается, заканчиваясь в переходном сечении. По мере удаления от источника происходит размывание струи и уменьшается продольная скорость.

Для описания скоростей в различных сечениях можно использовать функцию Шлихтинга [6]:

$$u = u_m(1 - \bar{y}^{1.5})^2, \quad (1)$$

Здесь  $\bar{y} = \frac{y}{b}$  – безразмерное расстояние от оси;

$b$  – половина ширины струи в сечении, для осесимметричной струи-радиус.

$$b = c' x. \quad (2)$$

В работе [6] представлены экспериментальные данные, рис. 29 на основании которых можно принять  $c' = 0,22$ .

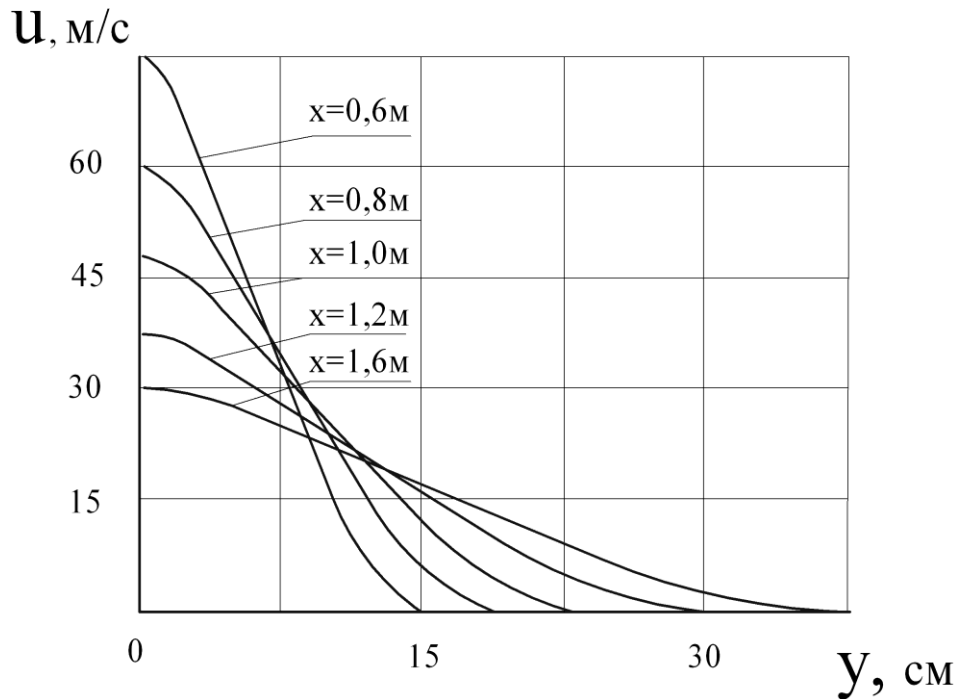


Рисунок 29 - Профили продольной скорости струи в разных сечениях основного участка струи [6]

Массовая доля воды в струе определяется как отношение:

$$w_M = \frac{\rho_B}{\rho_{\text{ВОЗ}}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ВОЗ}}$  – плотность воздуха;

$\rho_B$  – плотность распыленной воды, представляющая отношение суммарной массы капель к объему воздуха.

Массовая доля воды имеет максимальное значение на оси струи.

Плотность воздушно-капельной смеси:

$$\rho_S = \rho_{\text{ВОЗ}} (1 + w_M). \quad (4)$$

Изменение состава струи влияет на величину  $c$  [6]:

$$c' = 0,22 \frac{\rho_{\text{ВОЗ}} + \rho_m}{2\rho_m}, \quad (5)$$

где  $\rho_m$  – плотность воздушно-капельной смеси на оси струи при максимальном значении массовой доли воды.

$$\rho_m = \rho_{\text{ВОЗ}} (1 + w_{M\text{МАХ}}), \quad (6)$$

где  $w_{M\text{МАХ}}$  – максимальная массовая доля воды, т.е. отношение ее массы к массе воздуха.

При распыливании воды из сопла круглой формы уравнение взаимосвязи безразмерной продольной координаты  $\bar{x}$  и радиуса струи  $\bar{b}$  [6]:

$$0,22\bar{x} = \bar{b} + \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \left[ \ln(1,22\bar{b}\sqrt{\zeta} + \sqrt{1 + 1,48\bar{b}^2\zeta}) - \right. \\ \left. - 0,25\arctan \frac{1,28\bar{b}\sqrt{\zeta}(\sqrt{1 + 1,48\bar{b}^2\zeta} - 0,24)}{\sqrt{1 + 1,48\bar{b}^2\zeta} + 0,31\bar{b}^2\zeta} \right], \quad (7)$$



где  $\zeta = \rho_{\text{воз}} / \rho_{\text{в}}$  – отношение плотности воздуха и воды;  $\bar{x} = \frac{x}{b_0}$ ;  $\bar{b} = \frac{b}{b_0}$ ;  $b_0$  – начальная полуширина (или радиус) струи.

Для поперечного профиля скоростей данной двухфазной струи остается справедливой формула Шлихтинга. Профиль концентрации примеси имеет вид

$$w_M = w_{M\text{MAX}}(1 - \bar{y}^{1,5}). \quad (8)$$

Численное решение уравнения 12 позволило получить график зависимости  $\bar{b}(\bar{x})$  рис.30, точки. В интервале  $0 < \bar{x} < 2500$  эта зависимость достаточно близка (с точностью  $\pm 10\%$ ) к простой линейной зависимости, рис. 32:

$$\bar{b} = 0,16\bar{x}. \quad (9)$$

Таким образом, наличие распыленной воды в составе струи приводит к уменьшению коэффициента  $c'$  в соотношении с 0,22 для однородной затопленной струи до 0,16 для воды, распыленной в воздухе.

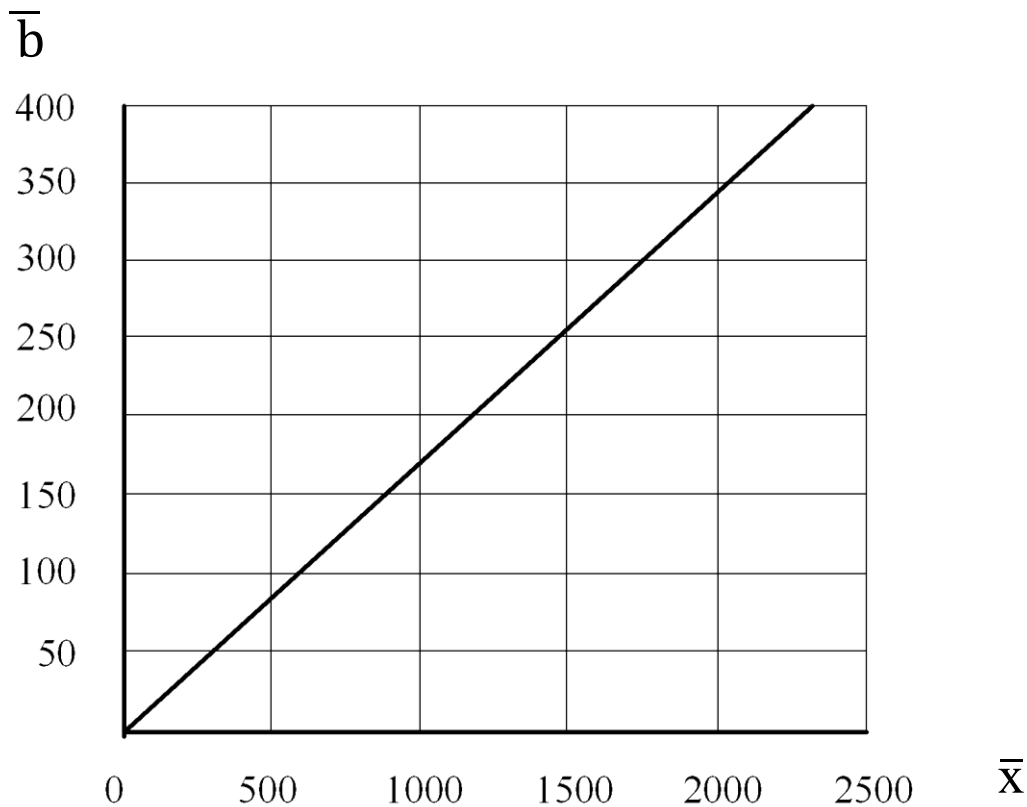


Рисунок 30 - Зависимость  $\bar{b}(\bar{x})$

Для повышения огнетушащей эффективности в воду вводят добавки, повышающие смачивающую способность.

Смачивание количественно характеризуется величиной краевого угла смачивания, образованного твердой поверхностью и касательной к поверхности жидкости в точке соприкосновения ее с твердым телом. Чем меньше краевого угол, тем лучше смачивание (рис.31).

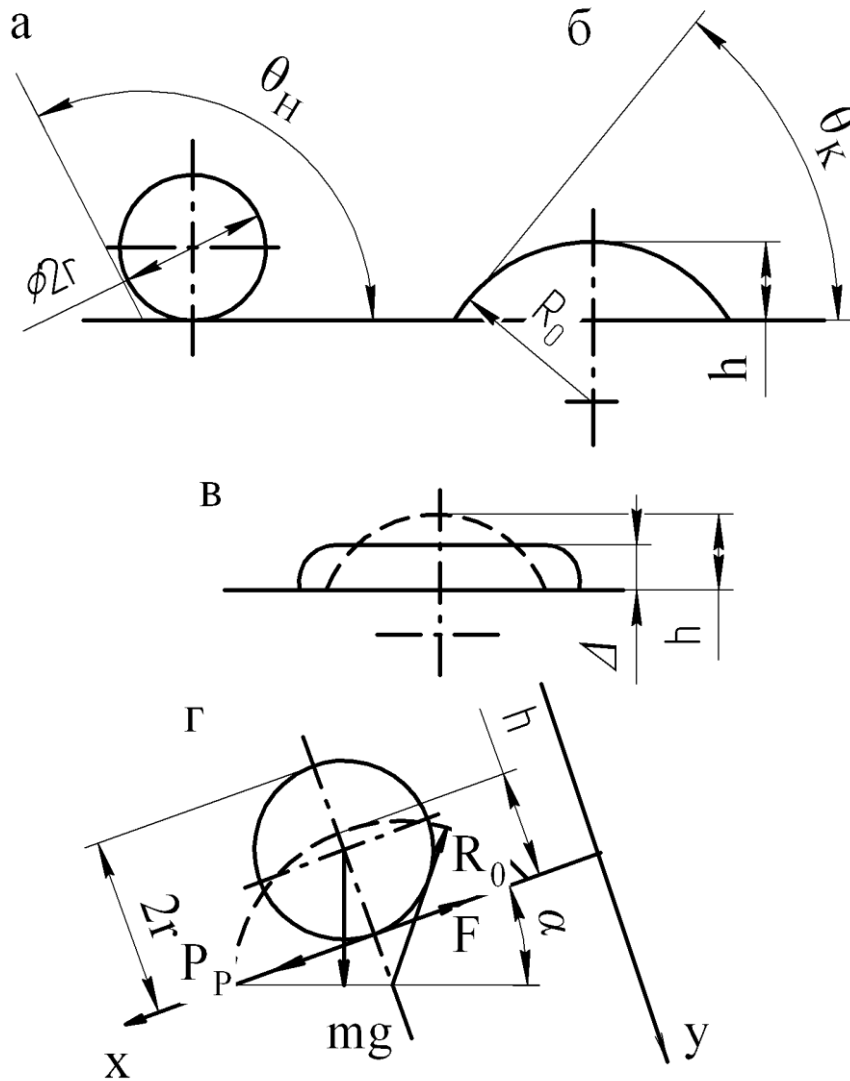


Рисунок 31– Расчетные схемы смачивания поверхности

Рассмотрим процесс смачивания. При попадании на поверхность твердого тела, капли жидкости первоначально имеют сферическую форму (рис. 31 а). Затем происходит растекание капли до высоты  $h$  (рис. 31 б), и минимальной толщины  $\Delta$  (рис. 31 в).

Рассматривая силы, действующие на каплю, можно выделить внешние силы (сила тяжести и сила взаимодействия частиц жидкости с частицами твердого тела) и внутренние (силы поверхностного натяжения).

Поэтому форма, которую принимает капля жидкости, определяется соотношением этих сил.

В рассматриваемом случае (рис. 31 г) благодаря незначительной массе капли и малой силе тяжести, действующая на нее принимает форму капли, близкую к шару.

На каплю, лежащую на поверхности под углом  $\alpha$  к горизонту действуют: сила тяжести  $mg$  и сила трения  $F$ .

$$mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_w g, \quad (10)$$

$$F = \mu S \frac{dV}{dy}, \quad (11)$$

где

$r$  – приведенный радиус капли;

$\rho_W$  – плотность жидкости (воды);

$\mu$  – вязкость жидкости;

$\frac{dV}{dy}$  – градиент скорости по высоте слоя площадью  $S$ .

Учитывая поверхностное натяжение, сила растекания определяется из выражения:

$$P_p = a_1 r \sigma (1 - \cos \theta), \quad (12)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$\theta$  – краевой угол смачивания.

Общее уравнение растекания капель по поверхности имеет вид

$$\frac{d(mV)}{dt} = mg \sin \alpha + P_p - F, \quad (13)$$

При испарении радиус капли и соответственно площадь ее поверхности уменьшаются  $S = a_1 r^2$ .

Здесь  $a_1$  – коэффициент, учитывающий изменение  $S$  и  $r$ . Для капли сферической формы  $a_{1max} = 4\pi$ .

Краевой угол  $\theta$  начальной стадии растекания  $\theta_H$  ( $\theta_{Hmax} = \pi$ ), конечной –  $\theta_K$ .

Тогда:

$$P_{cp} = \frac{a_1 r \sigma \int_{\theta_H}^{\theta_K} (1 - \cos \theta) d\theta}{\theta_H - \theta_K} = a_1 r \sigma \beta, \quad (14)$$

где  $\beta$  – коэффициент изменения формы капли ( $0 < \beta \leq 1$ )

$$\beta = \frac{\int_{\theta_H}^{\theta_K} (1 - \cos \theta) d\theta}{\theta_H - \theta_K}, \quad (15)$$

В общем случае, когда  $\theta_H \neq \pi$ ,  $\theta_K \neq 0$

$$\beta = 1 - \frac{\sin \theta_K - \sin \theta_H}{\theta_H - \theta_K}, \quad (16)$$

При полном растекании  $\theta_H = \pi$ ,  $\theta_K = 0$

$$P_{cp} = 2\pi r \sigma, \quad (17)$$

Для растворов  $\theta_K \neq 0$ , тогда

$$P_{cp} = 2\pi r \sigma \beta, \quad (18)$$

Теоретическая зависимость  $\beta = f(\theta)$  показана на рис. 34.

Пятно смачивания капли можно определить из равенства объемов (начального и конечного).

$$\frac{\pi d_K^3}{6} = \frac{\pi \ell^2}{4} \Delta \quad (19)$$

где

$\ell$  – размер пятна смачивания после растекания капли до толщины  $\Delta$ .

Из соотношения (16) получим

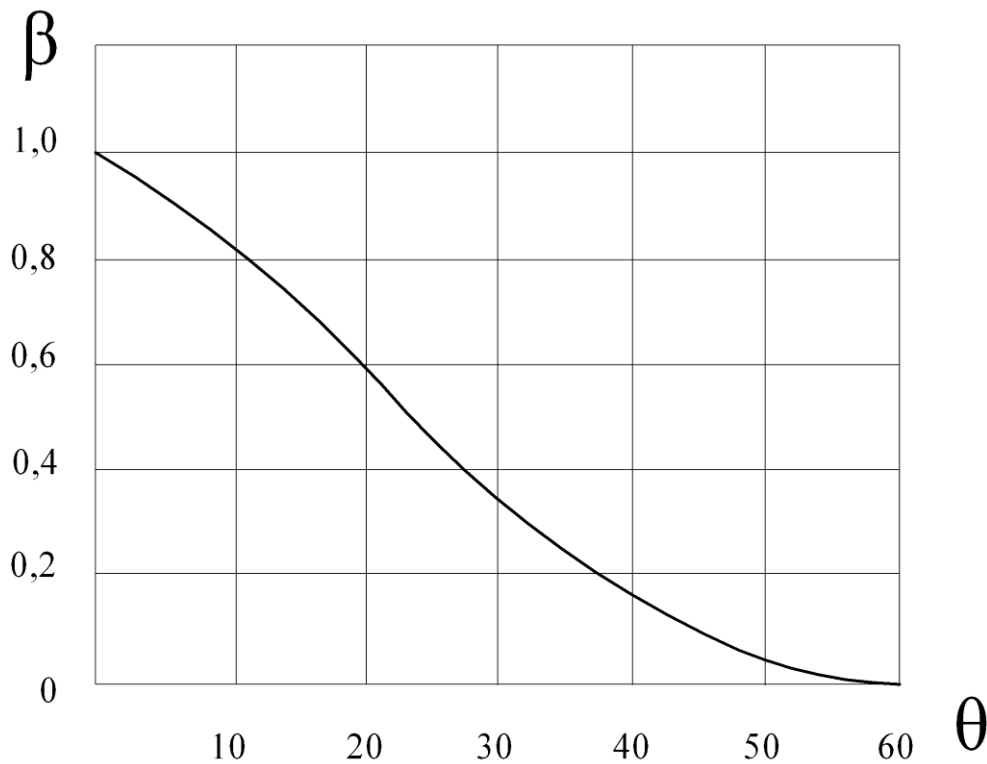


Рисунок 32–Теоретическая зависимость коэффициента  $\beta$  от угла смачивания  $\theta$

$$\ell = \sqrt{\frac{2d_K^3}{3\Delta}}. \quad (20)$$

Для смачивания ЛГМ при создании заградительной полосы минимальный слой жидкости  $\Delta$  и требуемое условие смачивания:

$$h_{CP} > \Delta, \quad (21)$$

где  $h_{CP}$  – толщина пленки жидкости.

Для достижения критического уровня влагосодержания толщина пленки жидкости должна составлять не менее 0,1 мм.

Учитывая, что скорость перемещения оператора постоянная ( $V_P = \text{const}$ ):

$$h_{CP} = \int q(L)dt = \int q(L) \frac{dL}{V_P}, \quad (22)$$

$$V_P h_{CP} = \int q(L)dL, \quad (23)$$

$q$  – производительность ранцевого лесного огнетушителя, л /мин;

$V_P$  – скорость движения оператора, равная скорости тушения кромки пожара, м/мин;

$L$  – длина кромки низового лесного пожара, м.

Рассмотрим эффективность процесса непосредственного тушения возгораний мелкораспыленной жидкостью.

Равномерность распределения слоя жидкости на ЛГМ, линейная интенсивность подачи, расход жидкости, скорость движения оператора с

ранцевым лесным огнетушителем – имеют большое значение для оптимизации технологии тушения пожаров.

Под линейной интенсивностью подачи воды понимается количество воды, подаваемое в единицу времени на единицу длины кромки низового лесного пожара.

В табл. 9 и 10 приведены среднестатистические данные по скорости тушения кромки низовых лесных пожаров ранцевым лесным огнетушителем РЛО-М в зависимости от интенсивности пожара и расхода воды [15].

Таблица 9 – Скорость тушения кромки низового пожара, м/час

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
устойчивый	20-40	40-80	80-150
беглый	30-50	50-100	100-200

Таблица 10 - Расход воды при тушении кромки низового лесного пожара длиной 1 м с использованием РЛО-М

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
I, л/м			
устойчивый	5,7-2,8	2,8-1,4	1,4-0,7
беглый	3,8-2,3	2,3-1,1	1,1-0,5

Линейная интенсивность I и время её подачи  $\tau$  при тушении кромки низового лесного пожара длиной 1 м [15]:

$$I' = \frac{q\tau k}{L}, \quad (24)$$

где

$\tau$  – время тушения кромки лесного пожара;

k – коэффициент использования рабочего времени ( $k = 0,85$ ).

Тогда время тушения, мин [15]:

$$\tau = \frac{LI}{qk}. \quad (25)$$

Производительность ранцевого лесного огнетушителя РЛО-М – 2,25 л/мин. Результаты расчетов времени тушения сведены в таблицу 11.

Таблица 11 –Время тушения кромки низового лесного пожара длиной 1 м с использованием РЛО-М

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
Время подачи воды, с			
устойчивый	180-90	90-45	45-24
беглый	120-72	72-36	36-18

Эффективность тушения пожара определяется правильным выбором расхода жидкости и обеспечением равномерности распределения по площади.

Средний слой жидкости, выливаемый за время движения оператора с РЛО-М, м:

$$h_{\text{CP}} = \frac{0,001q}{BV_p}, \quad (26)$$

где

$B$  – ширина захвата, м;

$V_p$  – скорость движения оператора, равная скорости тушения кромки пожара, м/мин

Практически ширина факела распыла определяется давлением, углом распыла и высотой расположения по отношению к обрабатываемой поверхности (рис. 33). Тип распыливающей насадки также должен обеспечивать максимальную равномерность распределения жидкости по площади.

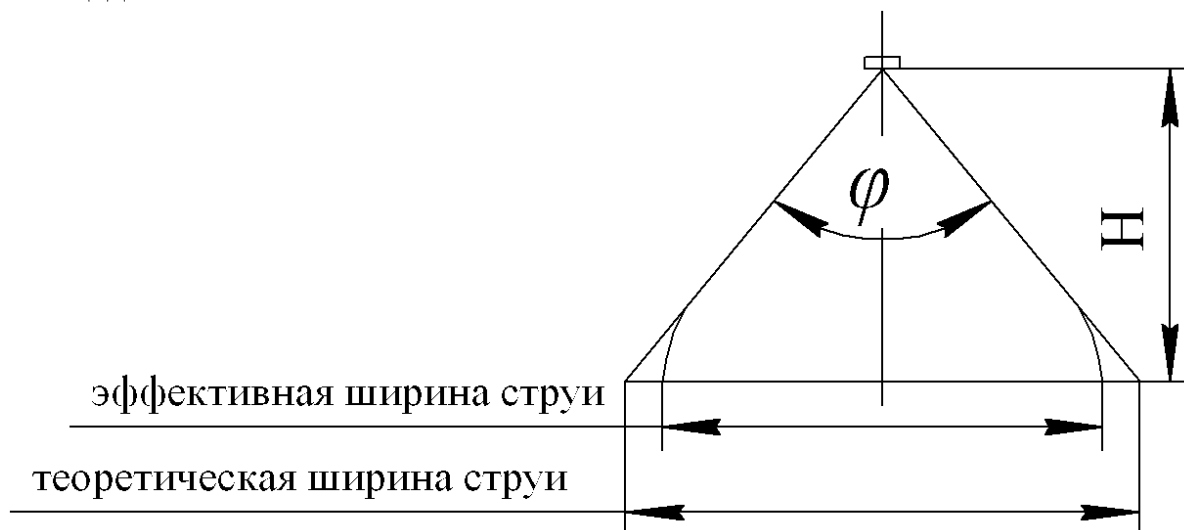


Рисунок 33 – Схема определения ширины струи

Значения ширины распыления в зависимости от высоты и угла факела распыла сведем в таблицу 12.

Таблица 12 – Теоретическая ширина распыления в зависимости от высоты и угла факела распыла

Угол факела	Теоретическая ширина струи В при высоте распыления Н в см											
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	100	120
20°	3,5	5,3	7,1	8,8	10,6	14,1	17,6	21,2	24,7	28,2	35,3	42
30°	5,4	8,0	10,7	13,4	16,1	21,4	26,8	32,2	37,5	42,9	53,6	64
45°	8,3	12,4	16,6	20,7	24,9	<b>33,1</b>	<b>41,4</b>	<b>49,7</b>	58,0	66,3	82,8	99
60°	11,6	17,3	23,1	28,9	34,6	<b>46,2</b>	<b>57,7</b>	<b>69,3</b>	80,8	92,4	115	138
90°	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	<b>80,0</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	140	160	200	240
120°	34,6	52,0	69,3	86,6	104	<b>139</b>	<b>173</b>	<b>208</b>	242	277	346	416
140°	55,0	82,4	110	137	165	<b>220</b>	<b>275</b>	<b>330</b>	385	440	550	660

Для определения эффективной ширины струи необходимы экспериментальные исследования. Оптимальная ширина струи более 30 см будет обеспечиваться углом факела более  $45^\circ$  при высоте распыливания порядка 40-60 см.

## 5.2 Водяной пар

Рассмотрим возможные механизмы воздействия струи водяного пара на процессы горения.

Водяной пар представляет собой воду, находящуюся в двухфазном состоянии. Жидкая и парообразная фазы соприкасаются между собой и находятся в неравновесном состоянии. Кроме того, температура струи водяного пара ниже равновесной. Поэтому струя водяного пара сопровождается процессами конденсации. Интенсивность конденсации пара определяется температурой переохлаждения, плотностью пара, скоростью истечения струи и параметрами окружающей среды. Необходимо произвести исследование характеристик струи и оценить их влияние на процесс горения.

Струя водяного пара оказывает на зону горения охлаждающее воздействие. Теплота горения расходуется на нагрев паров воды, находящихся в зонах горения, испарение очагов конденсации, нагрева образовавшихся паров. Уменьшение тепловыделения снизит плотность конвективных потоков, что в свою очередь уменьшит скорость подвода горючих продуктов пиролиза и кислорода воздуха. Процесс охлаждения может привести к понижению интенсивности горения или к его полному прекращению.

Пары воды, оказавшиеся в зоне горения, разбавляют концентрацию горючих реагентов, участвующих в горении и кислорода воздуха, подводимого конвективными потоками. Процесс разбавления уменьшает скорость реакции горения.

Водяной пар представляет собой тепловой экран из жидкой и газовой фазы, обладающий способностями частично поглощать, отражать и пропускать лучистые тепловые потоки из очага горения. Экранирующая способность паровой струи определяется такими параметрами как: ширина струи, температура и оптическая плотность паровой среды.

С учетом того, что большая часть энергии пожара передаётся в окружающее пространство излучением, то струя пара, характеризующаяся достаточно большой оптической плотностью, может привести к прекращению горения.

Струя водяного пара может оказывать динамическое воздействие на зону пиролиза и зону смешивания продуктов пиролиза с кислородом воздуха. Воздействуя на данные зоны, струя пара может сдувать горючие продукты пиролиза и кислорода воздуха, что в свою очередь приводит к прекращению горения за счёт достижения критических концентраций горючего и окислителя.

Интенсивность влияния рассмотренного процесса на фронт пожара характеризуется скоростью истечения пара.

Процесс конденсации паров воды на поверхности лесных горючих материалов влияет на интенсивность теплопередачи в зонах прогрева и сушки, и соответственно на скорость пиролиза. Влага на поверхности увеличивает процесс теплообмена фронта пожара с окружающей средой, а это в свою очередь приводит к понижению температуры в зонах пожара, и замедляет процесс пиролиза. Все это способствует уменьшению количества образовавшихся горючих продуктов пиролиза, и значит уменьшает интенсивность горения.

Т. о. огнетушащее воздействие струи водяного пара на фронт пожара может быть реализовано:

- охлаждением зоны горения;
- динамическим сдувом горючих продуктов пиролиза и кислорода воздуха;
- экранированием зоны горения от зон прогрева и пиролиза;
- изоляция факела пламени от кислорода воздуха.

Процесс получения пара из жидкости может осуществляться двумя способами: испарением и кипением.

Процесс парообразования начинается при достижении температуры кипения жидкости, называемой температурой насыщения  $t_n$ . Температура кипения, или температура насыщения,  $t_n$  зависит от природы вещества и давления, при этом с повышением давления  $t_n$  увеличивается. Давление, соответствующее температуре насыщения  $t_n$  – давление насыщения  $p_n$ .

Насыщенный пар – пар, образующейся в процессе кипения и находящейся в динамическом равновесии с жидкостью. Насыщенный пар при этом по своему состоянию может быть сухим насыщенным и влажным насыщенным.

Сухой насыщенный пар – пар, не содержащий жидкости и имеющий температуру насыщения ( $t=t_n$ ) при данном давлении.

Влажный насыщенный пар – это равновесная смесь, состоящая из капель жидкости, находящейся при температуре кипения, и сухого насыщенного пара.

Отношение массы сухого насыщенного пара  $m_{с.п.}$  к массе влажного насыщенного пара  $m_{в.п.}$  называется степенью сухости влажного пара:

$$x' = m_{с.п.} / m_{в.п.}, \quad (27)$$

Очевидно, что для жидкости  $x'=0$ , для сухого насыщенного пара  $x'=1$ .

Если к сухому насыщенному пару подводить теплоту, то его температура увеличится. Пар, температура которого при данном давлении больше, чем температура насыщения ( $t>t_n$ ), называется перегретым [83].

Т. о. водяной пар находится в трёх состояниях: влажного насыщения, сухого насыщения, перегретом состоянии.

Процесс парообразования в  $p$ - $v$ -координатах представлен на рисунке 34. Здесь кривой I соответствует вода при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Состояния кипящей воды для различных давлений будут соответствовать линии II. Она представляет собой зависимость удельных объемов кипящей воды от давления. Кривой III – сухой насыщенный пар [83].



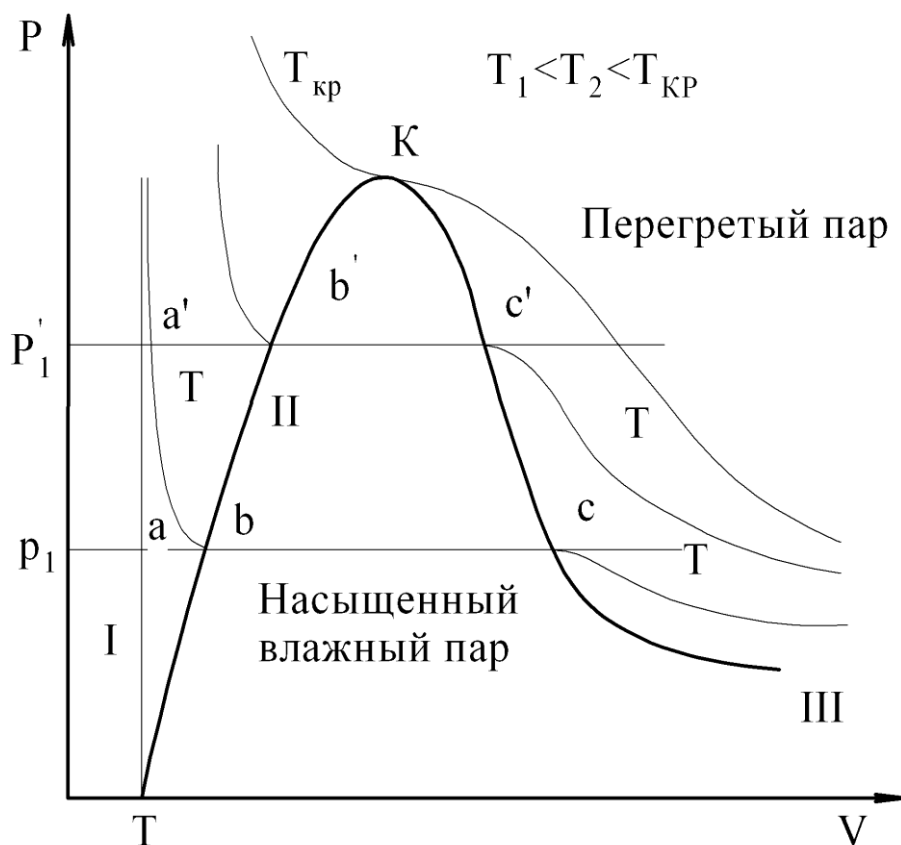


Рисунок 34 – График процесса парообразования в  $pV$ -координатах (давление-объем)

Область между кривыми I и II – жидкость; область между II и III – смесь кипящей жидкости и пара, т.е. влажный насыщенный пар. Область правее кривой III – перегретый пар.

К – критическая точка, характеризует критическое состояние, при котором исчезает различие в свойствах пара и жидкости. Критические параметры водяного пара соответствуют значениям:  $t_{кр} = 374,15^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{кр} = 22,129\text{МПа}$ ;  $V_{кр} = 0,00326\text{ м}^3/\text{кг}$  [98].

Количество теплоты, необходимое для доведения воды до кипения определяется зависимостью:

$$q_{ab} = \int_a^b c_b dt \quad (28)$$

где  $c_b$  – удельная теплоемкость воды,  $c_b = \frac{4200\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Дальнейший подвод теплоты к кипящей воде, который осуществляется в испарителе парогенератора, сопровождается бурным парообразованием. Таким образом, участку  $b$ — $c$  соответствует равновесное состояние смеси жидкости и пара. Т.е. влажный насыщенный пар. В каждой точке этого процесса вода будет характеризоваться массовой долей содержащегося в ней сухого насыщенного пара.

Процесс парообразования  $b$ — $c$  является одновременно изобарными изотермическим:  $p=p_1=\text{const}$ ;  $T=T_1=\text{const}$ .

Затрачиваемая теплота расходуется не на повышение температуры, а только на преодоление сил притяжения между молекулами и на работу расширения пара.

Состояния сухого насыщенного пара при разных давлениях соответствует линии III- верхней пограничной кривой.

В процессе парообразования удельный объем воды резко увеличивается. Так, например, для воды при  $p = 0,1$  МПа удельный объем кипящей воды  $V=0,001043$  м<sup>3</sup>/кг. Удельный объем сухого насыщенного пара равен 1,696 м<sup>3</sup>/кг. При этом с увеличением давления эта разница уменьшается, и в критической точке К удельные объёмы воды и пара равны 0,00326 м<sup>3</sup>/кг. При давлениях и температурах больших критических процесс парообразования будет отсутствовать.

Поскольку пар как реальный газ не подчиняется простым закономерностям идеальных газов, расчеты процессов с водяным паром проводятся с помощью таблиц или графически с помощью диаграмм.

### Фазовые состояния

Одно из основных свойств сухого насыщенного пара заключается в том, что дальнейший подвод теплоты к нему приводит к возрастанию температуры пара, т. е. перехода его в состояние перегретого пара, а отвод теплоты — к переходу в состояние влажного насыщенного пара (рис.35).



Рисунок 35 – Фазовая диаграмма для водяного пара в T, s координатах (температура-энтропия)

Область I – газообразное состояние, где перегретый пар обладает свойствами реального газа. Область II – равновесное состояние воды и насыщенного водяного пара, т.е. двухфазное состояние. Эту область также называют областью парообразования. Область III – жидкое состояние - вода.

Область IV – равновесное состояние твердой и жидкой фаз. Область V – твердое состояние.

На T-s диаграмме видно, что по мере увеличения давления теплота парообразования уменьшается и в критической точке соответствует нулю.

При постоянном объеме плотность насыщенного пара растет с повышением температуры. Зависимость давления насыщенного пара от температуры не является линейной функцией (рис. 36). С увеличением температуры возрастает плотность насыщенного пара, а давление пропорционально произведению плотности на температуру. Зависимость давления насыщенного пара от температуры является экспоненциальной. Она представлена участком 1-2 графика.

Эту зависимость нельзя вывести из законов идеального газа. В точке 2 вся жидкость испаряется; и при дальнейшем повышении температуры пар становится ненасыщенным, и его давление растет по линейному закону (участок 2-3).

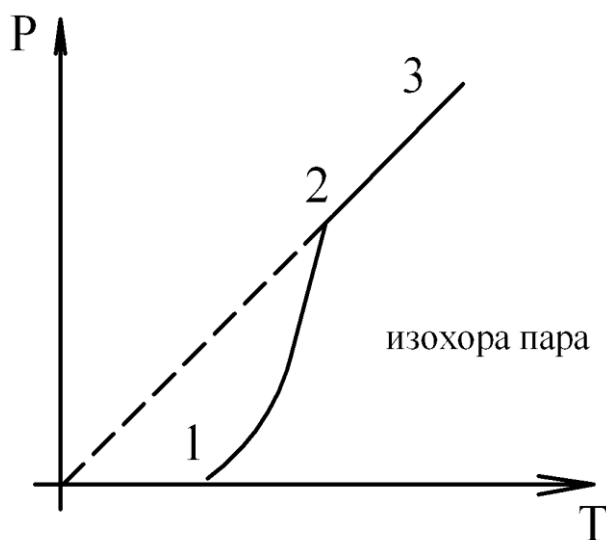


Рисунок 36 – Зависимость давления пара от температуры

### 5.3 Свойства двухфазных жидкостей. Характерные формы парожидкостных течений в штанге парогенератора

#### Структуры парожидкостных потоков

Совместное движение пара и жидкости по трубе характеризуется наличием различных форм течения, определяемых в основном распределением фаз по сечению трубы, а это в свою очередь зависит от следующих факторов: объемного содержания легкой фазы в потоке смеси, скорости течения, физических свойств обеих фаз и др.

Легкая фаза - пар может быть распределен в жидкости в виде мелких пузырьков или отдельных паровых скоплений. А может двигаться в виде ядра внутри жидкостного кольца.

Различаются следующие основные структуры парожидкостных потоков в трубах (рис. 37):

-расслоенная, характеризующаяся послойными движениями пара и жидкости с четкой гладкой или волнистой поверхностью раздела;

-кольцевая, характеризующаяся течением основной массы жидкости по внутреннему периметру трубы в виде жидкостного кольца, внутри которого с высокой скоростью движется паровое ядро.

Кроме перечисленных, авторы многих работ отмечают существование эмульсионного, распыленного и некоторых других видов потоков. Поток с отдельными пузырьками пара (рис. 39, е) возникает при малых расходах пара, когда почти все сечение трубы занимает жидкость. Отдельные скопления пара наверху трубы вследствие капиллярных явлений прилипают к стенкам, в этом случае их скорость уменьшается.

При пробковой структуре течения (рис. 39, г), при увеличении паросодержания, паровые и жидкостные скопления двигаются по трубопроводу с очень большими 30—40 м/с скоростями, что вызывает значительные пульсации давления. С еще большим увеличением паросодержания возникает волновой, а затем расслоенный поток.

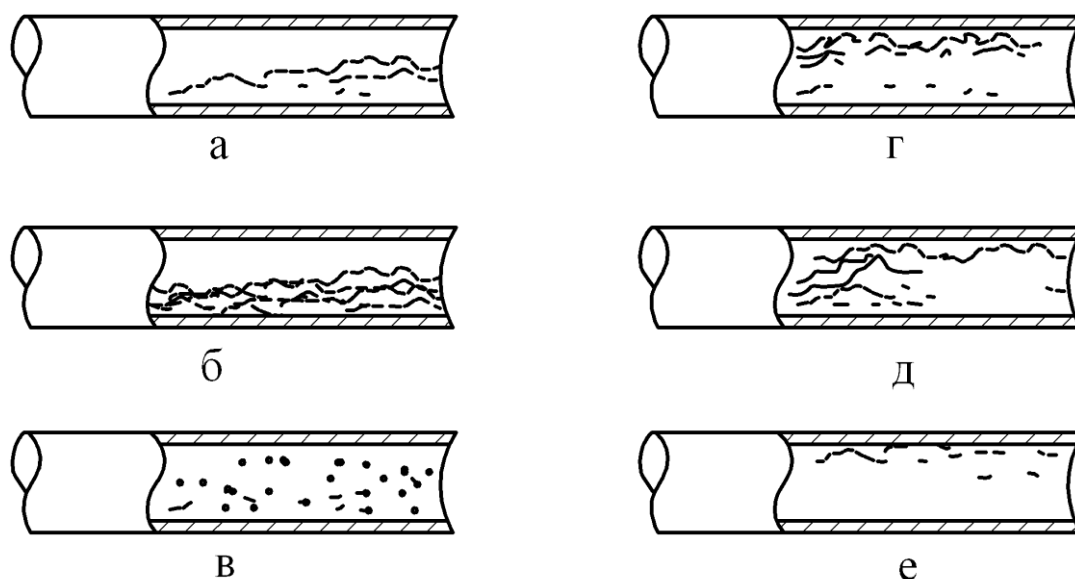


Рисунок 37 – Структуры течения парожидкостных смесей  
а - расслоенная, б - с волновой поверхностью раздела, в - кольцевая,  
г и д- пробковая, е - пузырьковая;

### Свойства двухфазных жидкостей

В турбулентном потоке газовые и жидкостные образования смесей деформируются. Эта особенность движения парожидкостных смесей

объясняется различием плотностей фаз и является причиной значительного многообразия форм, видов и структур течения. Закономерности движения двухфазных жидкостей значительно сложнее течения однородной жидкости.

Турбулентные парожидкостные потоки имеют крупную структуру, т. е. носят черты начальной стадии турбулентности. При движении же парожидкостной смеси изменение скоростей фаз приводит к перестройке форм течения даже на небольшой длине.

Наиболее характерной особенностью исследований процесса течения парожидкостных смесей в трубах, является использование чисто эмпирических методов решения поставленной задачи.

Сущность метода исследований в этих работах заключалась в проведении эксперимента в лабораторных или натуральных условиях, в процессе которого определялись лишь расход пара и жидкости.

Четкая и устойчивая граница раздела между паром и жидкостью, определяющая расслоенную структуру, позволяет записать уравнения движения отдельно для паровой и жидкостной фаз [38], рис.38.

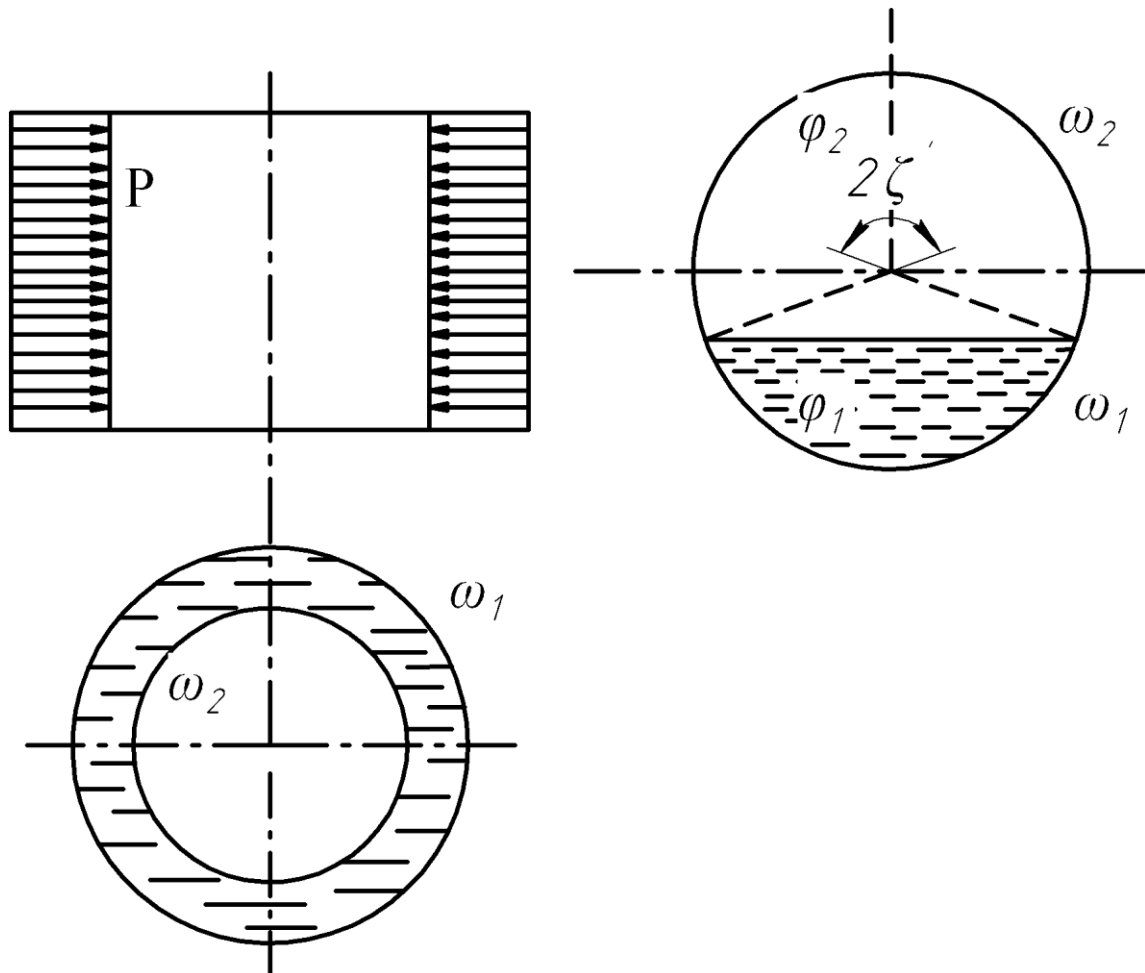


Рисунок 38 –Расслоенная структура течения

При пленочном течении жидкость смачивает внутренние стенки трубы, а пар движется в центре кольца, является осесимметричным лишь в

вертикальном потоке. Штанга опрыскивателя не занимает вертикального положения в процессе тушения возгораний.

Истинное газосодержание и периметр трубы, смоченные паром и жидкостью характеризуются центральным углом  $2\zeta'$ .

Площадь сегмента, заполненного жидкостью, из геометрических соотношений можно определить как:

$$S_{\text{сегм}} = S_{\text{воды}} = \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi\zeta'}{180} - \sin\zeta' \right), \quad (29)$$

где  $R$  – радиус трубы штанги парогенератора.

Площадь, занятая паром в штанге парогенератора

$$S_{\text{пар}} = S_{\text{тр}} - S_{\text{воды}}, \quad (30)$$

$S_{\text{тр}}$  – площадь сечения трубы штанги парогенератора.

$$S_{\text{пар}} = \pi R^2 - \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi\zeta'}{180} - \sin\zeta' \right). \quad (31)$$

Разделение по фракциям в зависимости от центрального угла представлено на рис. 39.

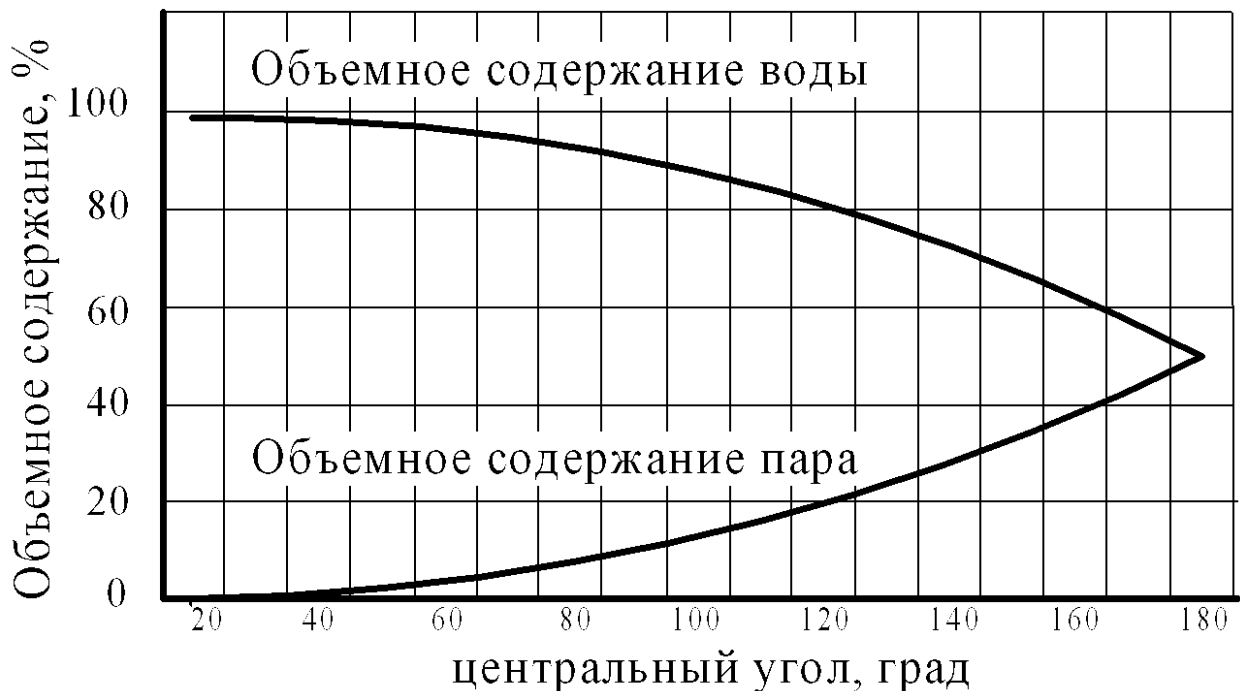


Рисунок 39 – Разделение по фракциям через центральный угол

Скорость паровоздушной смеси определяется:

$$w_{\text{см}} = \frac{G_{\text{п}} - G_{\text{в}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (32)$$

где

$G_{\text{п}}$  – объемный расход пара,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$G_{\text{в}}$  – объемный расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

### Скорость истечения пара из сопла

Предположим, что пар с некоторым удельным объемом ( $v_1$ ) находится в резервуаре под определенным давлением ( $p_1$ ). Процесс истечения заключается в перемещении пара из среды, имеющей давление  $p_1$  (резервуар) в окружающую среду, давление в которой  $p_2 < p_1$ .

При перемещении потока пара через сопло его потенциальная энергия очень мала и ее изменением пренебрегают. Кинетическая энергия в этом случае возрастает.

$$l_{1,2} = w_2^2/2 - w_1^2/2, \quad (33)$$

где  $w_1$  – скорость перемещения потока во входном сечении насадки;

$w_2$  – скорость на выходе сопла.

Скорость истечения пара из насадки.

Чаще всего скорость  $w_1$  намного меньше скорости  $w_2$  ( $w_1 \ll w_2$ ), поэтому ею пренебрегают и считают  $w_1 = 0$ .

Тогда, м/с:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2l_{12}} = \sqrt{2l_{12}} \quad (34)$$

Массовая скорость перемещения потока:

$$u = G_c / S_{\text{ТР}} = w_2 \rho_{\text{ПАР}}, \quad (35)$$

где  $G_c$  – секундный расход пара, кг/с;

$S_{\text{ТР}}$  – площадь сечения потока равная площади сечения трубы парогенератора или насадка, м<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{ПАР}}$  – плотность рабочего тела, кг/м<sup>3</sup>.

$$u = \rho_{\text{ПАР}} \sqrt{2l_{12}}, \quad (36)$$

Выразив площадь сечения потока через диаметр насадка, можно получить соотношение между скоростью истечения пара и расходом

$$D = 2 \sqrt{\frac{G_c}{\pi w_2 \rho_{\text{ПАР}}}}, \quad (37)$$

Полученное выражение позволяет подобрать конструктивные параметры парогенератора с режимом тушения (температура, давление и плотность пара) и требуемым расходом пара, зависящим от вида и количества ЛГМ.

### Конденсация пара

Конденсация может происходить в объеме пара, так и на охлаждаемой поверхности теплообмена. Тогда в первом случае образование конденсированной фазы происходит самопроизвольно при значительном переохлаждении пара относительно температуры насыщения и на холодных поверхностях, вводимых в пар.

На поверхности может образоваться пленка конденсата с толщиной, намного превышающей расстояние эффективного действия межмолекулярных

сил. В некоторых случаях поверхность тела может быть покрыта отдельными каплями конденсата.

Первый вид конденсации – жидкая конденсированная фаза образуется на поверхности теплообмена в виде устойчивой пленки (пленочная) конденсация.

Второй вид конденсации – когда происходит образование капель (капельная).

Пленочная конденсация имеет место, если конденсат смачивает данную поверхность теплообмена. Если же конденсат не смачивает поверхность, то происходит капельная конденсация.

При капельной конденсации водяного пара теплоотдача может быть во много раз больше, чем при пленочной.

Будем полагать, что поверхность конденсации плоская и толщина слоя конденсата, находящегося на стенке, намного больше радиуса действия межмолекулярных сил. А тепловой поток не будет изменяться по толщине пленки конденсата. Пренебрегая теплотой переохлаждения конденсата, можно написать:

$$g_{\text{ПП}} = e_{\text{П}} m_{\text{К}}, \quad (38)$$

где  $g_{\text{ПП}}$  - тепловой поток, Вт;

$m_{\text{К}}$  - количество конденсата, образовавшегося в единицу времени, или массовый расход конденсата, кг/с;

$e_{\text{П}}$  - теплота фазового перехода. При конденсации сухого насыщенного пара отдается теплота фазового перехода  $e$ , Дж/кг.

Соотношение между расходом конденсата и тепловым потоком может быть представлено в дифференциальной форме

$$\frac{dm_{\text{К}}(x)}{dx} = j(x) = \frac{g_{\text{ПП}}(x)}{e_{\text{П}}}, \quad (39)$$

где

$j$  – локальная плотность поперечного потока массы или скорость конденсации, кг/(м<sup>2</sup>·с);

С учетом плотности конденсата, скорость приращения конденсата в данной точке струи пара можно определить по следующей зависимости:

$$m_{\text{К}}(L) = W(L) / \rho_{\text{W}}, \quad (40)$$

Толщина пленки конденсата, образовавшегося на поверхности за время  $\tau$ , составит

$$h = \int_{\tau} m_{\text{К}}(L) d\tau. \quad (41)$$

Рассматривая технологию проведения работ и учитывая, что скорость перемещения оператора с источником пара равна

$$V_{\text{P}} = dL/d\tau = \text{const} \quad (42)$$

где  $V_{\text{P}}$  – скорость перемещения оператора с источником пара имеем:

$$d\tau = dL/V_{\text{P}}. \quad (43)$$

Произведя замену переменной, получили:

$$h = \int_{\tau} m_{\text{К}}(L) d\tau = \int_L m_{\text{К}}(L) dL/V_{\text{P}}. \quad (44)$$



Таким образом, интегрирование скорости приращения пленки конденсата в каждой точке струи пара, позволяет получить произведение скорости перемещения парогенератора на толщину пленки жидкости, образовавшейся в результате конденсации.

Для оценки эффективности использования водяного пара в процессе увлажнения элементов ряд исследователей приводят понятие условной толщины капли (Н), как отношение объема капли ( $V_K$ ) к площади её контакта с элементом лесных горючих материалов (S) и радиусу исходной капли (r):

$$H = V / Sr \quad (45)$$

Удельная толщина капли в зависимости от краевого угла смачивания:

$$H = \frac{1 - \cos(\theta)}{6} \left( 3 + \frac{(1 - \cos(\theta))^2}{(\sin(\theta))^2} \sqrt[3]{\frac{4}{(1 - \cos(\theta))^2 (2 + \cos(\theta))}} \right). \quad (46)$$

#### 5.4 Подбор конструктивных параметров парогенератора

Основными конструктивными параметрами парогенератора являются: длина, диаметр штанги парогенератора, длина нагревательного элемента, необходимый объем бака воды, мощность нагревателя (для электрического устройства).

Минимальное давление для преобразования воды в насыщенный пар – 0,1 МПа.

Максимальное давление – 22 МПа.

Критическая температура – 374,15 °С.

**Для автономной мини-установки принимаем:**

Объем воды – 8 литров.

Создаваемое давление – 0,2 МПа.

Диаметр выходного отверстия – 3 мм.

**Для электрической мини-установки:**

Объем воды принимаем 4 литра.

Создаваемое давление – от 0,2 МПа.

Диаметр выходного отверстия 3-5 мм (регулируемое).

Ограничивающим фактором при задании объема бака воды в обоих случаях является вес.

Из формулы 46 можно выразить зависимость расхода пара от диаметра штанги парогенератора и давления (рис. 40).

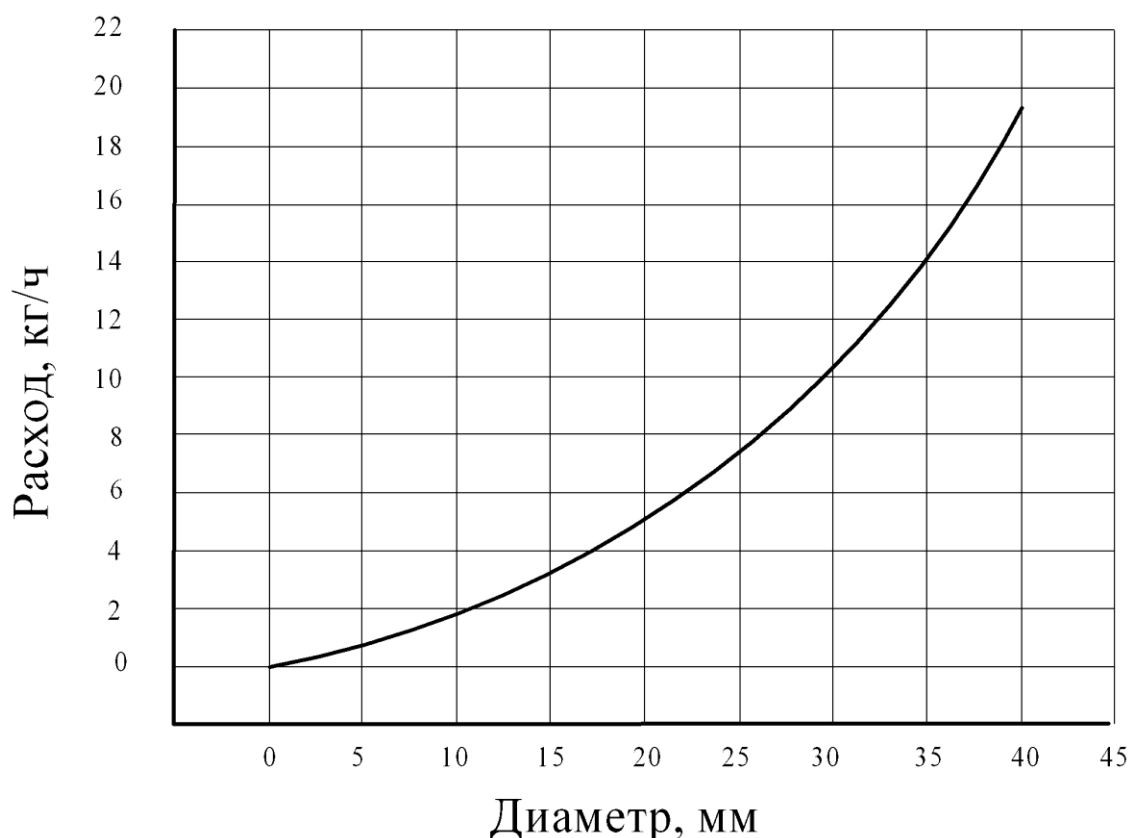


Рисунок 40 – Подбор диаметра отверстия по расходу:

На основании анализа технологии и технических средств тушения лесных пожаров предложены решения, обеспечивающие минимальное расходование огнетушащих средств. Рассмотрена возможность тушения распыленной водой и паром.

Представлена методика расчета струи распыленной жидкости на основе теории затопленных струй. Рассмотрена работа ранцевого лесного огнетушителя РЛЮ-М в режиме распыленной подачи жидкости. Теоретические исследования позволили выявить соотношения между скоростью тушения кромки пожара, расходом воды, интенсивностью ее подачи и временем тушения. Определены оптимальные соотношения угла факела распыла, высоты подачи струй и ширины струи.

Рассмотрен процесс смачивания поверхности лесной подстилки, определение краевого угла смачивания, способов повышения смачивания твердой поверхности. Получены зависимости скорости движения оператора для обеспечения необходимой толщины слоя огнетушащей жидкости при создании заградительной полосы.

Рассмотрены возможные механизмы воздействия струи водяного пара на процессы горения и процесс конденсации пара, свойства двухфазных жидкостей и пара. Подобраны основные конструктивные параметры парогенератора, режим тушения, требуемый расходом пара, зависящий от вида и количества ЛГМ.

Определена эффективная скорость перемещения оператора при создании заградительной полосы исходя их процесс смачивания поверхности ЛГМ и образованного слоя конденсата. Расчетная эффективная скорость перемещения источника пара составляет порядка 2 км/ч.

## **6 КРАТКАЯ ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Цель – выявление закономерностей при тушении распыленной водой и водными растворами, паром, двухфазными средами «пар-вода» и проведение оценки влияния их параметров на эффективность тушения лесного низового пожаров и проведение сравнительной оценки.

Для подтверждения теоретических исследований необходимо определить следующие параметры тушения водой и водными растворами:

- геометрические характеристики распыленных водных струй;
- режимы тушения (скорость и время тушения, интенсивность);
- краевой угол смачивания при тушении водными растворами.

Исходя из возможных механизмов прекращения горения струями двухфазных сред и паром наиболее актуальным является определение следующих характеристик струи:

- геометрических характеристик струи;
- температуры и скоростного напора по оси струи;
- оптической плотности струи пара;
- содержания пара в струе.

А также необходимо определить параметры взаимодействия:

- смачиваемость поверхности;
- толщины пленки конденсата;
- краевого угла смачивания.

### **Методика проведения экспериментов**

#### **Предлагаемые устройства и конструкции ручных огнетушителей**

Для проведения исследований возможностей тушения лесных низовых пожаров тонкораспыленной водой, паром, двухфазными средами были разработаны следующие технические средства.

- К ранцевому лесному огнетушителю РЛО-М и Ермак был разработан ряд распыливающих насадок с различным углом распыла и расходом (рис.41).

- Насадок распылитель с перфорированной пластиной 1 с большим количеством отверстий, полимерной чашей с меньшим количеством перфорированных отверстий, выполненных под углом 2 и накидной гайкой 3.

При повороте накидной гайки и совместно с ней чаши 2 часть отверстий совпадают или перекрываются, меняя таким образом угол распыла при неизменном расходе, уменьшая или увеличивая интенсивность.

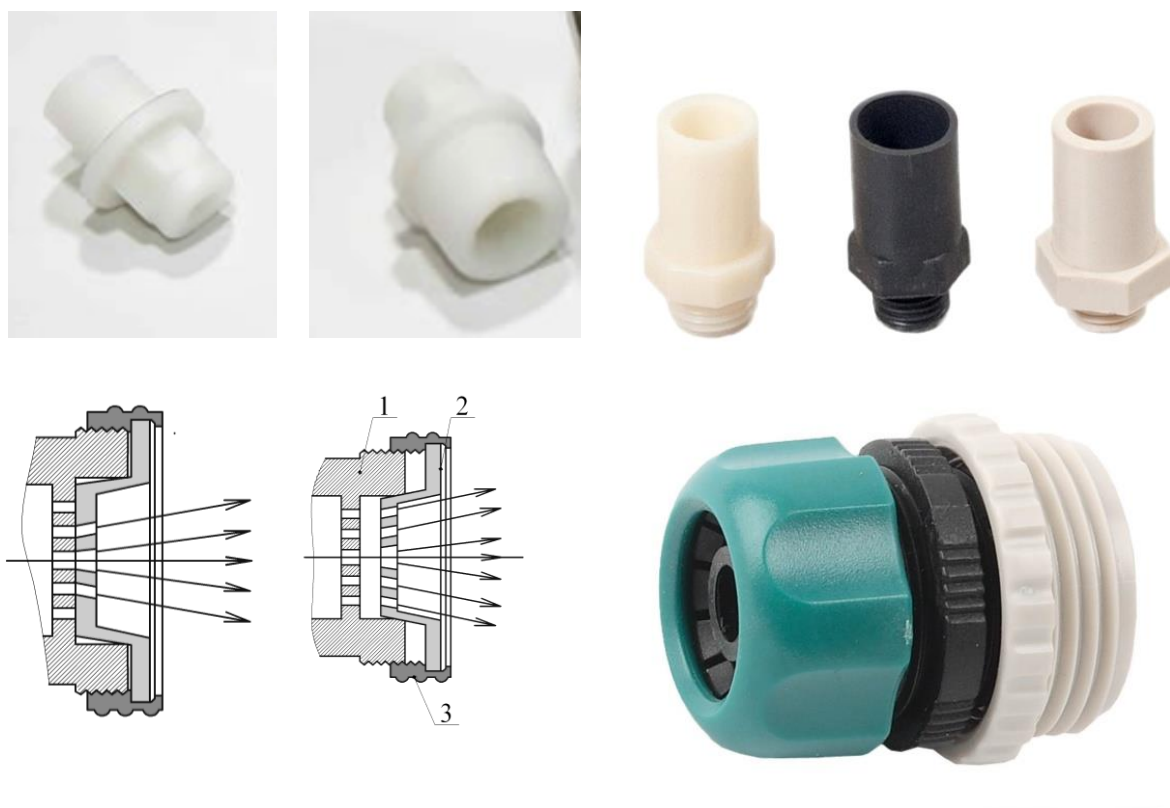


Рисунок 41 – Распыливающие насадки

#### 1. Автономная парогенераторная мини-установка [24, 25].

Автономная парогенераторная мини-установка, состоит из двух основных частей: нагревательного устройства и теплообменника (рис.42-45).

В качестве нагревательного устройства используется горелка 1 паяльной лампы с краном 2, зафиксированная в кожухе. Расходная емкость оборудована встроенным насосом 3 для подачи под давлением бензина в горелку.

Теплообменник представляет собой устройство, состоящее из металлического кожуха 4, системы трубопроводов и расходной емкости 5. Кожух выполнен в виде стальной трубы диаметром 60 мм, длиной 500 мм, в которую встроено крепежное устройство 6 для горелки, в котором имеются отверстия, через которые поступает воздух. Расходная емкость для воды 7 рассчитана на объем 8 литров.

Выходной патрубок расходной емкости для воды через вентиль 8 и шланг соединен с медной трубкой 9, намотанной на кожух и предназначенной для предварительного разогрева воды. Внутренний диаметр выходного сопла – сменный от 2 до 5 мм. Для теплоизоляции кожух теплообменника покрыт асбестом. Для переноски установки имеется ручка 10.

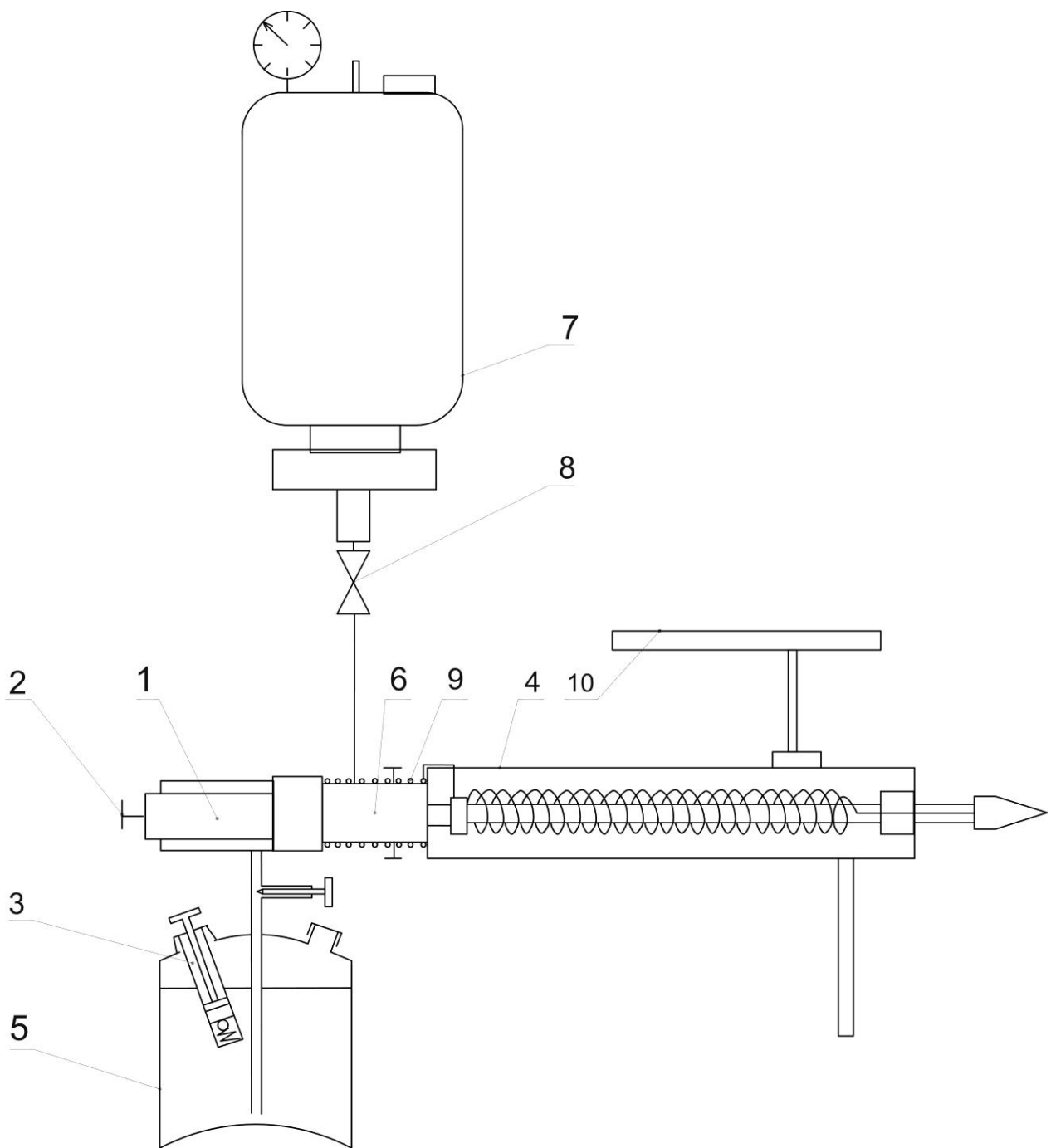


Рисунок 42– Схема автономной парогенераторной установки

Для повышения производительности и увеличения скорости тушения пожаров была разработана электрическая парогенераторная установка (рис. 46, 47), включающая расходную емкость 1, с заливной горловиной 2, электрическим нагревательным элементом 3, основным 4 и сбросным 5 клапанами [24, 25].



Рисунок 43- Автономная парогенераторная установка



Рисунок 44 Автономная парогенераторная установка, подготовленная к работе (с защитным кожухом и рюкзаком)



Рисунок 45—Емкость

Аварийное автоматическое устройство 6 срабатывает при превышении температуры выше критической. Распыляющее устройство представляет собой штангу 7, на конце которой установлено сопло 8 с регулирующим краном 9. Установка работает от генератора 10, устанавливаемого на малые средства передвижения.

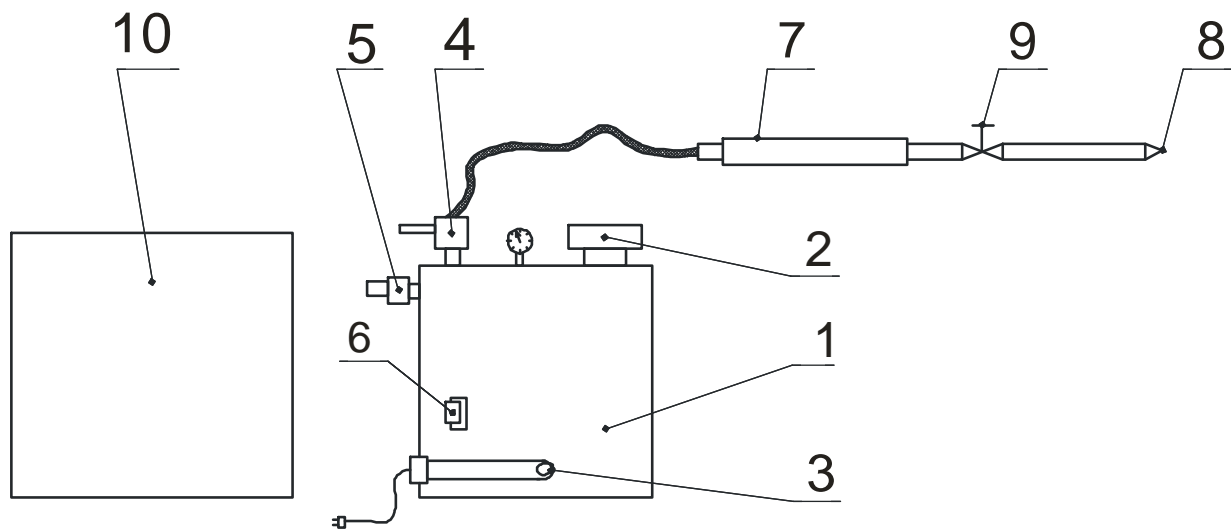


Рисунок 46– Электрическая парогенераторная установка



Рисунок 47 – Электрическая парогенераторная установка





Рисунок 48 – Эффект смачивания сухой травы

### **Исследование увлажняющей способности пара, воды, двухфазных сред**

Для обоснования эффективности технологии косвенного тушения лесных пожаров и создания заградительных полос были проведены исследования краевых углов смачивания от продолжительности обработки водой и паром при помощи ранцевого лесного огнетушителя РЛО-М с применением смачивателя (20% раствор хлористого кальция с добавкой 0,5%-ого смачивателя ОП-7) и парогенераторов.

Определялись геометрические характеристики струи пара, температура, скоростной напор, содержания пара в струе, масса конденсата. Для определения температуры поверхностей использовался тепловизор Testo 881-2. Кратность испытаний – от 3 до 5.

В ходе экспериментов по исследованию увлажняющей способности струи пара определялась интенсивность увлажнения  $W$  элементов поверхностей помещаемых на ось струи пара на различные расстояния  $L$  от выходного сопла в диапазоне расстояний от 0,05 м до 2,5 м с интервалом 0,05 м. Для этого определялась масса конденсата, которая оседает на единичной площади,  $m^2$  пористой увлажняемой поверхности в единицу времени, с.

$$W=(m-m_0)/S_0 \tau, \text{ г/м}^2\text{с} \quad (47)$$

где  $m_0$ ,  $m$  –соответственно значения массы образцов в граммах до и после помещения в поток струи пара на различных расстояниях от сопла парогенератора;

$S_0$  – площадь образца;

$\tau$ – время воздействия струи пара на образец.

В качестве увлажняемой поверхности использовались образцы из фильтровальной бумаги в форме круга с диаметром 20 мм.

Образец помещали в специальный контейнер, где его крепили на выдвижном устройстве при помощи иголок, чтобы его не уносило потоком струи пара.

Выдвижение образца из контейнера и возвращение в исходное положение синхронизировалось по моменту выдвижения в поток струи пара и обратно. Фиксировалось электрическим секундомером.

В этом случае исключалось взаимодействие пара с образцом увлажняемой поверхности до попадания его в поток струи пара и обеспечивалось равное время обработки паром всей поверхности образца. Масса образцов до и после помещения их в поток струи переохлажденного водяного пара измерялась при помощи весов с точностью  $10^{-4}$  г.

### Измерение краевых углов

Для обоснования эффективности технологии косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи водяного пара были проведены эксперименты по измерению краевых углов смачивания, рис. 49.

Краевой угол смачивания определили методом «сидящей капли». В качестве исследуемых образцов использовались сухие, одинаковые по форме и размерам травинки осоки, затем бруски дерева.

Сначала определялся краевой угол смачивания сухих образцов, а затем образцов, обработанных струей водяного пара.

Исследовалось влияние на краевой угол смачивания следующих параметров струи переохлажденного водяного пара:

-расстояния от сопла парогенератора до исследуемого образца;

-времени обработки паром поверхности образца.

Краевой угол контакта отсчитывался с помощью объектива микроскопа при прямом наблюдении угла.

Объем капли и краевой угол определяются следующей зависимостью:

$$V_K=\pi r^3 / 6[3\text{tg}\theta/2+(\text{tg}\theta/2)^3], \quad (48)$$

где  $V_K$ -объем капли;

$r$  - измеряемый радиус капли;

$\theta$  - угол смачивания.

При определении краевых углов важно проводить измерения сразу после нанесения капли на поверхность. Испарение воды приводит к сжатию капли и изменению краевого угла.

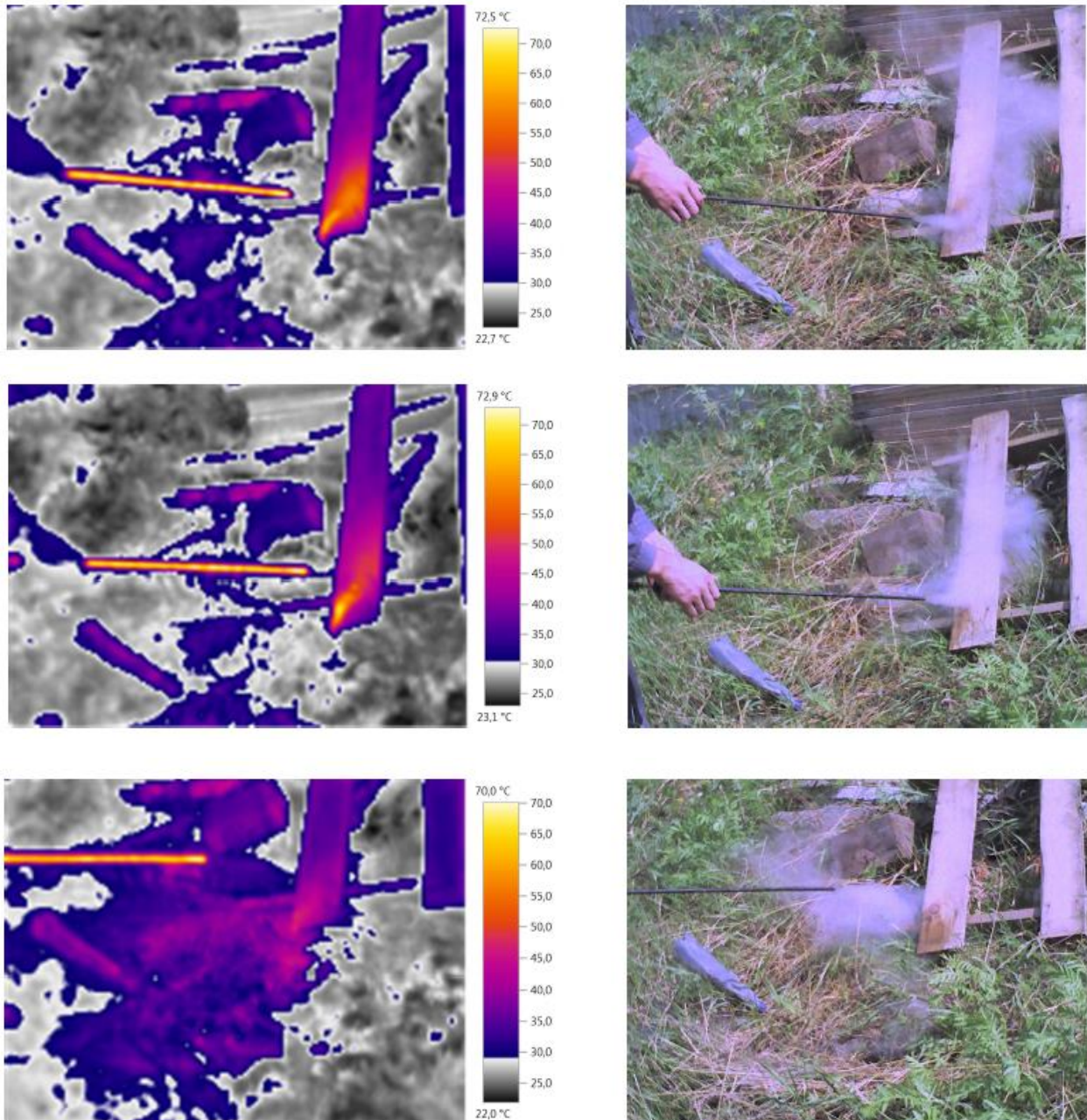


Рисунок 49 - Эффект смачивания поверхности древесных материалов водяным паром

Краевые углы определяют с помощью микроскопа, снабженного гониометрической насадкой. Гониометр содержит угловую шкалу, с помощью которой измеряют краевые углы.

Величина краевого угла смачивания  $\theta$  – разность отсчета при первой и второй установке угловой шкалы. Измерения проводят с обеих сторон капли ( $\theta_{\text{лев}}$  и  $\theta_{\text{прав}}$ ) и берут среднее значение  $\theta_{\text{ср}}$ .

## Определение характеристик струи

Оптические методы исследования применяются для изучения двухфазных потоков [98]. Для определения физических процессов, происходящих в потоках с фазовыми переходами, используются методы светорассеяния. Эти методы основаны на измерении характеристик рассеянного излучения.

Наиболее распространенным является метода прозрачности. Метод позволяет определять границы физических процессов, происходящих в струе водяного пара. При этом предполагается в качестве зондирующего светового потока использовать луч лазера, а в качестве приёмника - фотоэкспонетр, который реагирует на интенсивность излучения лазерного луча. По ослаблению интенсивности луча в струе пара можно определить оптическую плотность паровой среды, которая зависит от интенсивности конденсации.

Измерение температуры производилось ртутным термометром. Применение его возможно вследствие того, что чувствительная часть термометра в несколько раз меньше по сравнению с геометрическими размерами параметров струи. Это позволяет фиксировать температуру струи пара всей площадью чувствительного элемента термометра без искажений результатов и нарушения структуры потока.

Скоростной напор по оси струи пара определяется трубкой Пито по показаниям манометра, установленного на ней. Поскольку кинетическая энергия струи пара с удалением от среза сопла убывает, для измерения скоростного напора по оси струи необходимо применять манометры различной чувствительности. Показания манометра  $\Delta P$  будет соответствовать скоростному напору, Па в сечении струи при выходе из насадка, т.е.

$$\Delta P = \rho_s w_2^2 / 2, \quad (49)$$

где  $\rho_s$  - плотность воздушно-капельной смеси на выходе из насадка, кг/м<sup>3</sup>;

$w_2$  - скорость истечения на выходе из насадка, м/с.

Расход, кг/с из сечения выходного сопла выражается следующей зависимостью [24, 25]:

$$G_c = \rho_s w_2 S, \quad (50)$$

где  $S_{тр}$  - площадь сечения выходного насадка или трубы штанги парогенератора, м<sup>2</sup>.

Следовательно, определив скоростной напор, можно рассчитать скорость истечения и плотность струи пара.

Зафиксировать геометрические размеры струи в каждом её поперечном сечении можно при помощи приборов, измеряющих длину. У выхода струи пара из сопла, где небольшое поперечное сечение струи и большой скоростной напор, применялся штангенциркуль, позволяющий измерить ширину видимых границ струи, не нарушая при этом структуры потока. При дальнейших измерениях, когда скоростной напор струи становится незначительным и внесение в поток небольших по сравнению с поперечным сечением предметов не влияет на форму и ширину сечения была использована измерительная линейка.

Расход воды из мерной ёмкости измерялась с помощью весов и секундомера. Измерение уровня в мерной ёмкости - оптическое, позволяющее достаточно быстро и точно измерить уровень жидкости.

Для исследования струи водяного пара была разработана установка, схема которой приведена на рисунке 50.

Измерение характеристик струи пара проводили при помощи следующих измерительных приборов: ртутного термометра, штангенциркуля, измерительной линейки, вольтметра, фотоэкспонетра, лазера, устройства вывода, секундомера, трубки Пито, пирометра, барометра.

Для измерения температуры по оси струи пара до  $50^{\circ}\text{C}$  использовался термометр ТЛ-4№2. Пределы измерения от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $55^{\circ}\text{C}$ , ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Погрешностью измерения составляет  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Для интервала температур больше  $50^{\circ}\text{C}$  использовался термометр ТЛ-4 №3. Пределы измерения от  $50^{\circ}\text{C}$  до  $105^{\circ}\text{C}$ , цена деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Погрешностью измерения составляет  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .

Измерение геометрических размеров струи осуществлялось по видимым границам. В интервале от выходного сопла до 150 мм при помощи штангенциркуля ШЦ-3. Его диапазон измерения 0-200мм. Ценой деления 0,05мм. Погрешность измерения составляет  $\pm 0,05^{\circ}\text{мм}$ .

Для получения направленного луча света использовался лазер марки ЛВ5М.

Для регистрации интенсивности луча лазера после прохождения через струю пара использовался электронный фотоэкспонетр «Фотон-1».

Прибор данной марки применяется для измерения освещённости в границах от 0,5 до 100 люкс. В качестве выносного фотодатчика применён сернисто-кадмиевый фоторезистор. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Питающий выпрямитель собран по схеме без трансформатора.

Экранирующая способность струи переохлаждённого водяного пара определялась с помощью пирометра С-300 "Фаворит". Диапазон измерения температур от  $-20$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . Предел допускаемой абсолютной и относительной погрешности  $\pm 1,5\%$ .

Расход воды из мерной ёмкости определялся измерением времени и уровня жидкости. Секундомер - суммирующего действия СОС пр-25Б-2-000,429В/061018. Цена деления -0,02 с, допустимая погрешность за 10 мин  $\pm 0,6\text{с}$ . С помощью секундомера регистрировались промежутки времени между замерами уровня высоты столба жидкости в мерной ёмкости. Уровень жидкости определялся встроенным в расходную ёмкость уровнемером.

Скоростной напор на оси струи пара измерялся при помощи трубки Пито с встроенным манометром ГОСТ 2405-72. Данный манометр имеет пределы измерения от 0 до 98068 Па с точностью измерения  $\pm 490,3$  Па.

Атмосферное давление измерялось барометром "БАММ-1".

При планировании эксперимента была принята трёхкратная повторность измерений.

Порядок выполнения измерений был следующим: устанавливался режим работы парогенератора, производилась выдержка, в течении которой регулировалась подача воды и топлива.

Экспериментальная автономная установка подготавливалась к работе в следующей последовательности. Расходная ёмкость паяльной лампы 1 заполнялась топливом и с помощью насоса 2, создавалось давление в расходной ёмкости. Ёмкость для воды 3 заливалась водой до верхней отметки уровнемера 4.

Воздушный баллон 5 заполнялся воздухом под давлением от 0,2 МПа. Открывался вентиль баллона со сжатым воздухом 9 и с помощью редуктора 10 устанавливалось рабочее давление в баке с водой. Вентилем 11, разделяющим расходную ёмкость и теплообменник, задавался расход воды.

Делалась выдержка порядка 5 минут, достаточная для прогрева установки. На готовой к работе установке регулировалась подача топлива в лампу и воды в теплообменник.

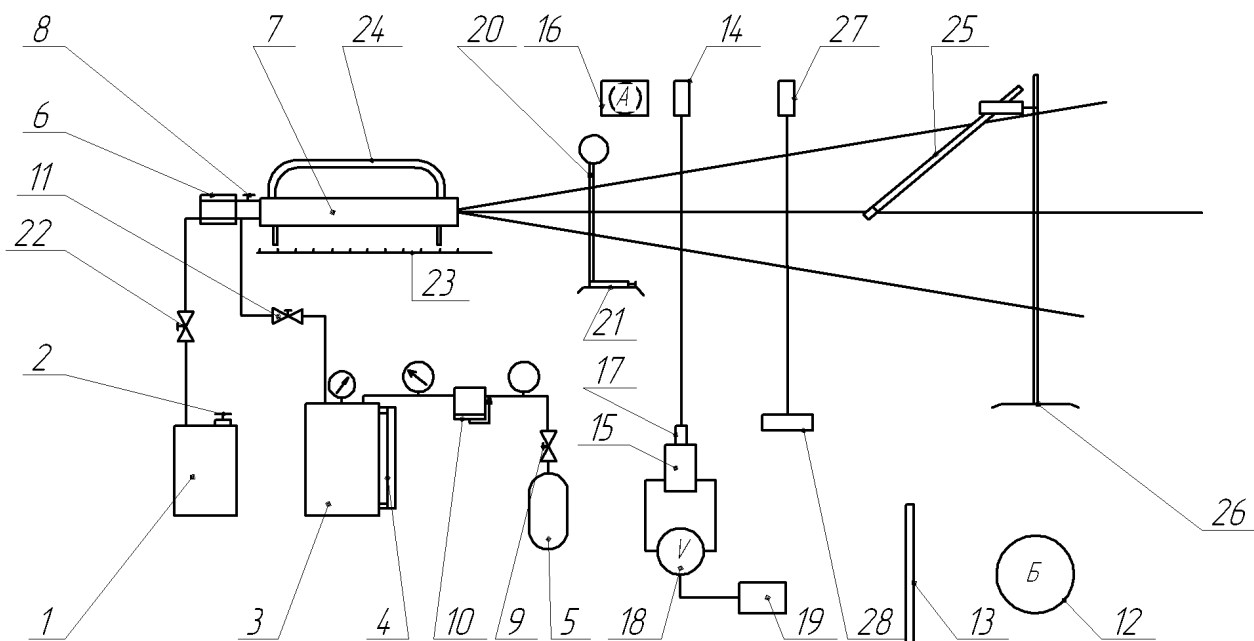


Рисунок 50- Схема расстановки приборов: 1-расходная емкость топлива, 2, 8-крепления, 3 –емкость для воды, 4-уровнемер, 5-баллон высокого давления, 6-горелка, 7-кожух, 9, 11, 22-кран, 10-редуктор, 12-барометр; 13, 25-термометр; 14-лазер, 15- фотоэкспонометр, 16-блок управления, 17-световой экран, 18-вольтметр, 19-устройство вывода показаний, 20-трубка Пито, 21-координатное измерительное устройство, 23- измерительная система, 24-ручка, 26-штатив, 27-пирометр, 28-контролируемая поверхность

Экспериментальная электрическая установка готовилась к работе аналогичным образом. Прогрев установки осуществлялся за 3 минуты.

Параметры окружающей среды контролировались во время проведения экспериментов. Атмосферное давление измерялось барометром «БАММ-1» -12, температура окружающего воздуха - термометром ТЛ-4 №2 -13.

На расстоянии 4 метров друг от друга устанавливали лазер 14 и фотоэкспонетр 15. При этом фокус луча лазера находился на оси струи, а сам луч лазера пересекался с осью струи пара под прямым углом. Светочувствительный элемент фотоэкспонетра экранировался от воздействия посторонних источников света при помощи светового экрана 17.

Показания фотоэкспонетра регистрировались вольтметром 18, к которому подключалось выводящее устройство 19 -ноутбук. При помощи трубки Пито 20 производились измерения скоростного напора струи пара на выходе из сопла экспериментальной установки. Трубка Пито устанавливалась на измерительное устройство 21, позволяющее регулировать расстояние до сопла парогенератора.

Для определения освещённости чувствительного элемента фотоэкспонетра измеряли интенсивность излучения в воздушной среде.

Проведя измерения освещённости в воздухе, т.е. вне области пара, парогенератор устанавливали так, что луч лазера и ось струи пара пересекались под прямым углом.

Измерения интенсивности излучения луча лазера после прохождения через ось струи производили на расстоянии от сопла парогенератора 10 мм. Дальнейшую регистрацию всех показаний производили по оси струи через интервал 0,01м до удаления от сопла 0,5м.

Затем с интервалом 0,03 м при дальнейших измерениях видимого спектра. Расстояние от мест измерений до сопла парогенератора определялось с помощью координатно-измерительной системы 23 и регулировалось.

Одновременно при помощи термометра 25, снимались показания температуры. При этом термометр устанавливался на штативе 26.

Затем производились измерения ширины струи. На выходе из сопла ширина струи измерялась линейкой.

Экранирующая способность струи пара определялась следующим способом: с одной стороны относительно струи пара устанавливался пирометр 27, с другой - контролируемая поверхность 28 электролита с постоянной температурой на поверхности.

Пирометр и контрольная поверхность располагались друг относительно друга на расстоянии двух метров. Экранирующая способность струи пара определялась при удалении от сопла в диапазоне от 0,4 до 2 м.

Для определения температуры поверхностей использовался тепловизор Testo 881-2. Прибор измеряет инфракрасное излучение в длинноволновом спектре в пределах поля обзора, рис. 51.



Рисунок 51 – Электрическая парогенераторная установка при работе

### **Определение коэффициента излучения посредством эталонного измерения**

Первоначально приклеивался к измеряемому объекту кусок самоклеящейся пленки. После небольшого промежутка времени с помощью тепловизора задавался коэффициент излучения самоклеящейся пленки, измерялась температура поверхности измеряемого объекта на участке, покрытом пленкой.

Полученное значение температуры являлось эталонным значением. Далее выполнялась настройка коэффициента излучения до тех пор, пока с помощью тепловизора не получалось значение температуры, равное эталонному, при измерении в области, не покрытой пленкой.

Соответствующий коэффициент излучения являлся коэффициентом излучения поверхности измеряемого объекта.

При помощи тепловизора было адаптировано расположение нагревательного элемента и защита корпуса.





Рисунок 52 Тепловизор Testo 881-2.

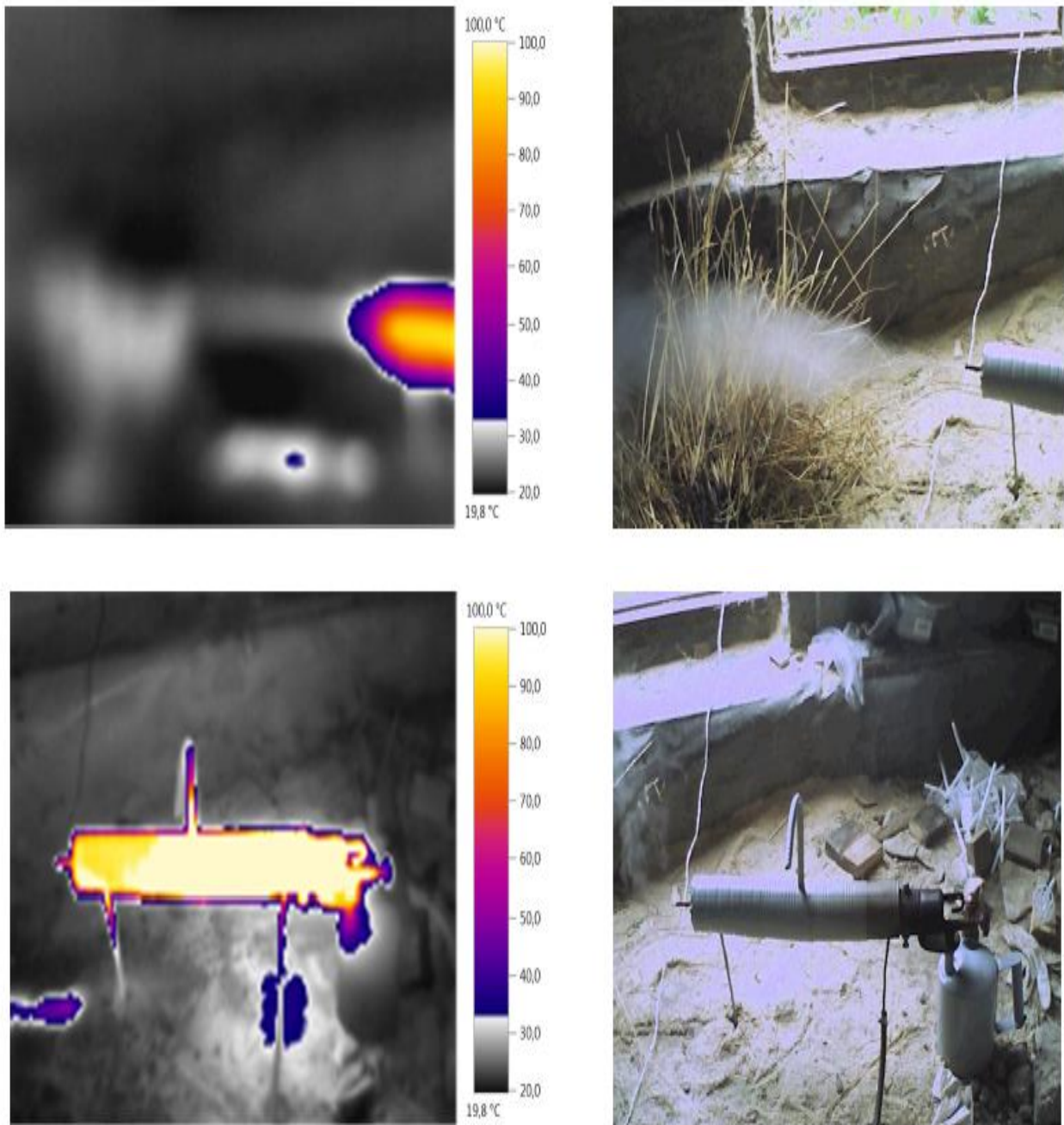


Рисунок 53- Адаптация расположения нагревательного элемента и защиты корпуса

### Полевые исследования

Полевые испытания проводились весной в пожароопасный период. Высота травы составляла порядка 20- 35 см, скорость ветра не более 1,5 м/с.

Фронт пожара был сформирован искусственно в результате зажигания лесных горючих материалов. Высота пламени достигала 20 - 30 см. Фронт пожара распространялся со скоростью 1-2 см/с.

Согласно классификации имел место низовой лесной пожар слабой и средней интенсивности. Ширина фронта достигала 0,3-0,5 м.

При проведении полевых испытаний была выбрана поляна, заросшая прошлогодней сухой травой с плотностью, поддерживающей горение. Что позволило сформироваться фронту низового лесного пожара.

Полевые испытания проводились весной в пожароопасный период, когда прошлогодняя трава высохла, а новая еще не выросла и осенью, после высыхания и выгорания травы. Высота травы составляла порядка 20- 35 см, скорость ветра не более 1,5 м/с.

Фронт пожара был сформирован искусственно в результате зажигания лесных горючих материалов в различных местах. Делалась выдержка, достаточная для формирования фронта низового лесного пожара. Высота пламени достигала 20 - 50 см. Фронт пожара распространялся со скоростью 1-2 см/с.

Согласно классификации имел место низовой лесной пожар слабой и средней интенсивности. Ширина фронта достигала 0,3-0,5 м.

Испытания проводились в равных условиях: состав, структура и влажность лесных горючих материалов, рельеф местности, параметры окружающей среды были одинаковыми. Кратность испытаний – от 3 до 5.



Рисунок 54- Подбор диаметров штанги и сопла парогенератора



Рисунок 55 Оценка эффективности тушения

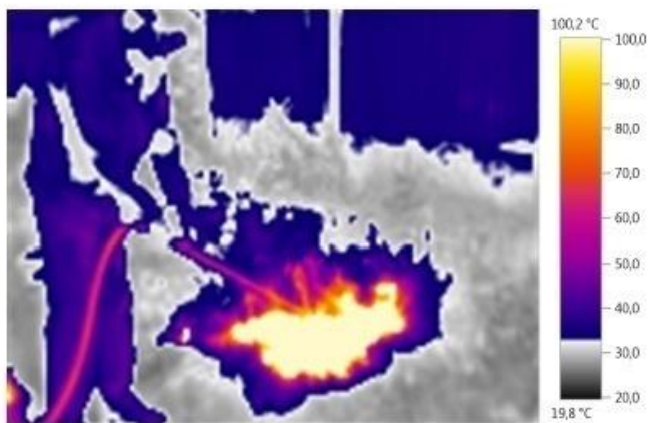


Рисунок 56- Работа установки (июнь)



Рисунок 57 Технология производства работ (октябрь)

## Обработка результатов экспериментальных исследований и определение статистических характеристик

Для оценки достоверности экспериментальных данных применены методики планирования эксперимента и методы математической статистики [4, 5, 17-19, 21, 26, 36]. Все экспериментальные значения параметров обрабатывались методами математической статистики. Распределение параметров  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$  характеризовалось:

Средней величиной распределения

$$X = \Sigma X_i / n_{\text{ИЗМ}}, \quad (51)$$

где  $X_i$  - результат отдельного измерения;

$n_{\text{ИЗМ}}$  - число измерений.

Дисперсией распределения:

$$D = \frac{\Sigma (X_i - \bar{X})^2}{n_{\text{ИЗМ}} - 1}; \quad (52)$$

Среднеквадратичным отклонением:

$$\sigma_{\text{от}} = D^{0,5}; \quad (53)$$

Коэффициентом вариации:

$$KB = \frac{100 \cdot \sigma_{\text{от}}}{\bar{X}}; \quad (54)$$

Точностью опыта:

$$P_{\text{оп}} = \frac{100 \cdot \sigma_{\text{от}}}{\bar{X} \cdot n_{\text{ИЗМ}}^{0,5}}. \quad (55)$$

Для определения корреляционной и статистической зависимости между переменными  $X$  и  $Y$  проводили  $n_{\text{ИЗМ}}$  число парных наблюдений и вычисляли коэффициент парной корреляции. Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов:

$$(Y_i - Y_p)^2 = \min, \quad (56)$$

где  $Y_i$  - фактическое значение зависимого показателя;  $Y_p$  - расчетные значения, найденные из уравнения регрессии.

Относительная величина радиуса полива, которому соответствует максимальная величина эпюры распределения дождя, определяется по формуле:

$$\left( \frac{X_i}{R} \right)_{\text{max}} = \frac{\gamma - 1}{(\gamma + \eta + 2)}. \quad (57)$$

Параметры  $\gamma$  и  $\eta$  связаны со средней величиной  $X$  и среднеквадратичной величиной распределения  $\sigma_c$  следующими зависимостями:

$$\eta = [(1 - X) / \sigma_c^2] \cdot [X \cdot (1 - X) - \sigma_c^2], \quad (58)$$

$$\gamma = X \cdot \eta / (1 - X). \quad (59)$$

Остаточная дисперсия:

$$D_{\text{ост}}^2 = \Sigma (Y_{\phi} - Y_p)^2 / (N - V_{\phi} - 1), \quad (60)$$

где  $V_{\phi}$  - количество факторов.

Оценка адекватности уравнения регрессии осуществлялась по критерию Фишера:

$$F = D^2 / D_{\text{ост}}^2, \quad (61)$$

Коэффициент множественной корреляции:

$$R_m = (1 - D_{\text{ост}}^2 / D^2)^{0,5}. \quad (62)$$

## 7 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Результаты исследований краевых углов смачивания от продолжительности обработки  $\tau$  при помощи ранцевого лесного огнетушителя РЛЮ-М представлены на рисунке 58.

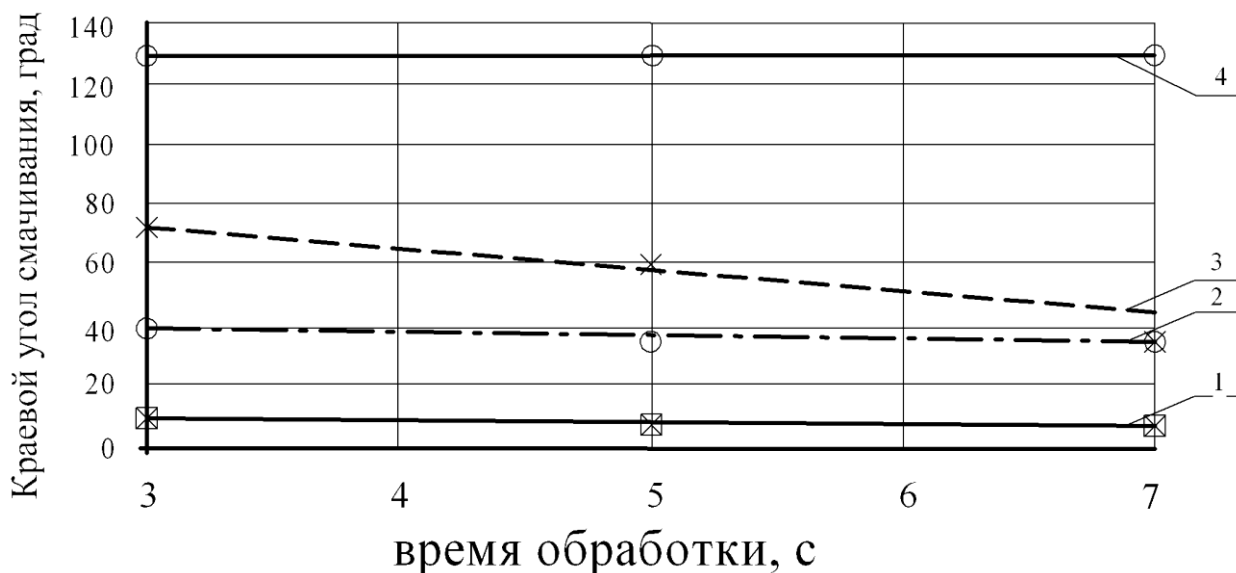


Рисунок 58 – Зависимость краевого угла от времени обработки тонкораспыленной водой:

- 1–расстояние от сопла насадки 1 м, смачиватель;
- 2–расстояние от сопла 2 м ( $\theta = -\tau + 43$ ;  $R^2 = 0,99$ , смачиватель);
- 3– расстояние от сопла 3 м ( $\theta = -6,25\tau + 89,5$ ;  $R^2 = 0,98$ , смачиватель);
- 4–вода без смачивателя.

Полученные данные свидетельствуют о том, что поверхность ЛГМ является практически не смачиваемой и обработка водой без смачивателя низкоэффективна и требует большей интенсивности. При обработке поверхности ЛГМ водным раствором со смачивателем краевой угол меньше, чем при обработке водой и уменьшается при увеличении времени обработки. С уменьшением расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности краевой угол также уменьшается.

Эпюра интенсивности подачи воды распылённой струей представлена на рисунке 59. Орошаемая поверхность принимает эллиптическую форму площадью  $1,0-1,5\text{ м}^2$ .

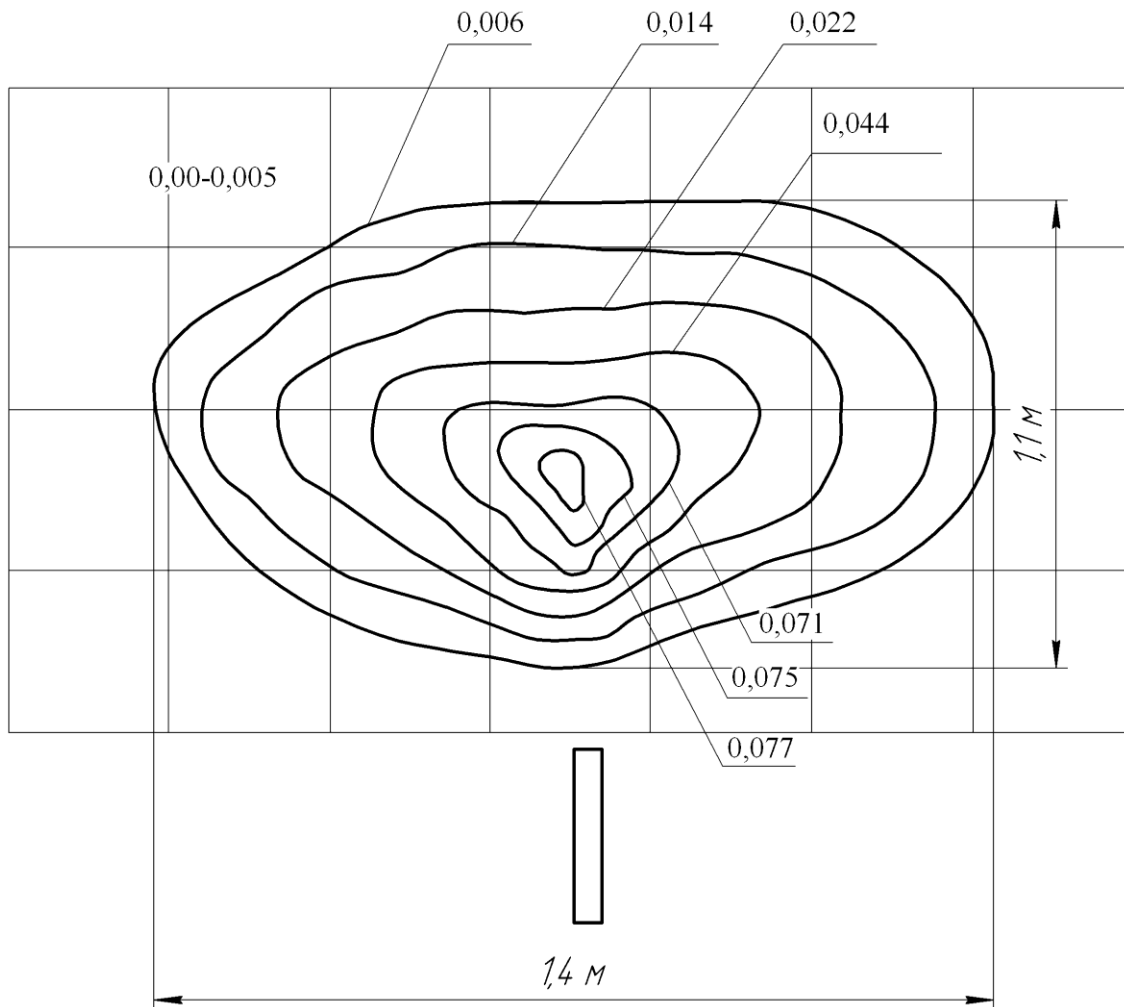


Рисунок 59– Эпюры интенсивности подачи воды из ранцевого огнетушителя распылённой струей стандартной распыливающей насадкой

Значения площади орошения, интенсивности и расхода воды ранцевым лесным огнетушителем РЛО-М со стандартной распыливающей насадкой представлены в таблице 13.

Из анализа данных рис. 59. и таблицы 13 следует, что интенсивность смачивания поверхности неравномерна. Центральная её часть, (40%) орошается с интенсивностью от 0,043 до 0,077 л/м<sup>2</sup>с, что составляет – 0,02 л воды (55 %).

Спроектированный гидропульт с рядом многоструйных насадок для ранцевых лесных огнетушителей РЛО-М с различным углом распыла и расходом позволяет повысить равномерность распыливания (рис. 60).



Таблица 13 –Интенсивность орошения и расхода воды на горизонтальной поверхности при использовании РЛО-М со стандартной распыливающей насадкой

Площадь, м <sup>2</sup>		Интенсивность орошения I <sub>0</sub> , л/м <sup>2</sup> с		Расход воды	
м <sup>2</sup>	%	max	min	л/с	%
0,002	0,29	0,077	0,077	0,00017	0,45
0,017	2,26	0,076	0,074	0,0012	3,34
0,067	8,96	0,075	0,070	0,0049	13,09
0,136	18,21	0,071	0,067	0,0096	25,84
0,315	42,05	0,067	0,047	0,0195	52,21
0,508	67,65	0,043	0,016	0,0253	67,49
0,751	100	0,014	0,004	0,0278	74,37

С интенсивностью от 0,068 до 0,058 л/м<sup>2</sup>с орошается порядка 35% всей площади, с интенсивностью 0,026-0,058 л/м<sup>2</sup>с орошается около 20%.

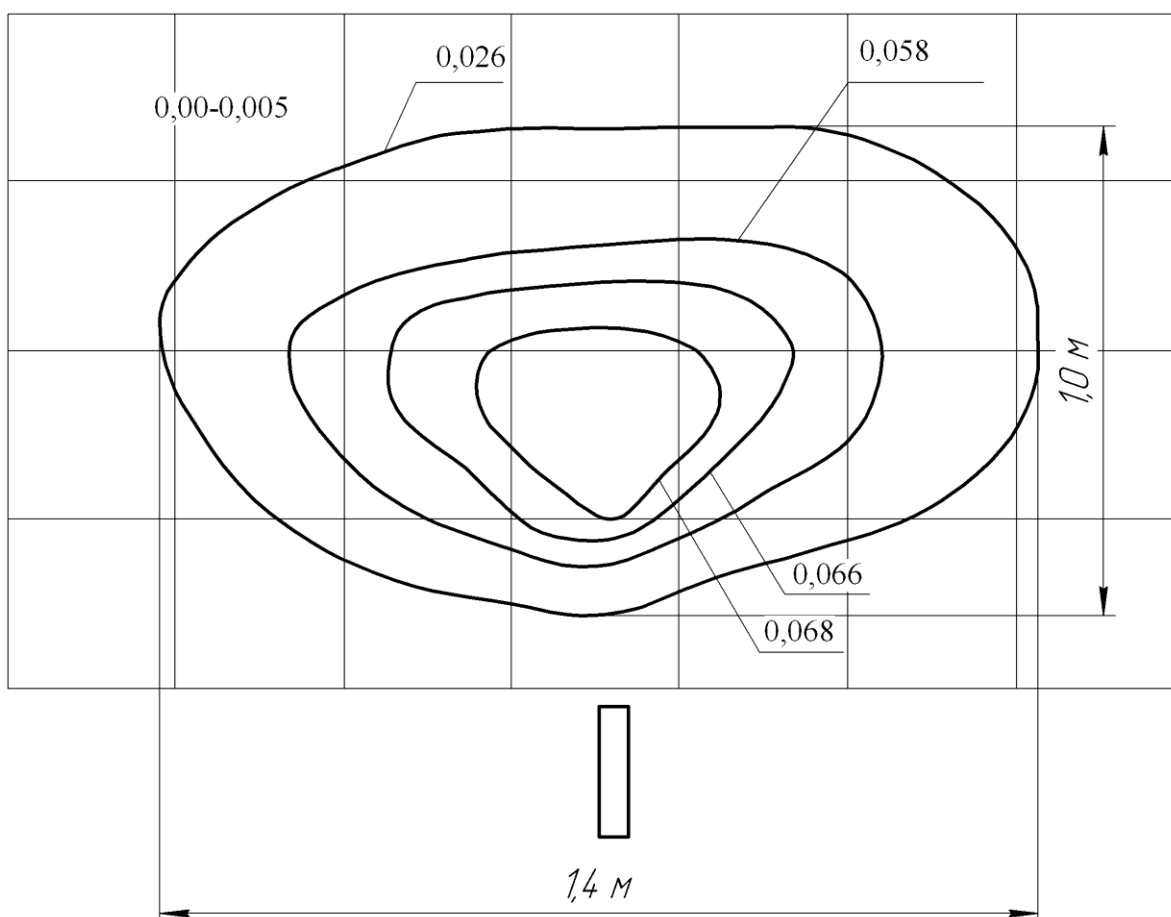


Рисунок 60– Эпюры интенсивности подачи воды из ранцевого огнетушителя распылённой струей разработанной многоструйной насадкой

Интенсивность смачивания поверхности неравномерна. Центральная её часть, (40%) орошается с интенсивностью от 0,043 до 0,077 л/м<sup>2</sup>с, что составляет – 0,02 л воды (55 %). Разработанные многоструйные насадки позволяют повысить равномерность распыливания, рис. 61. С интенсивностью от 0,068 до 0,058 л/м<sup>2</sup> с орошается порядка 35% всей площади, с интенсивностью 0,026-0,058 л/м<sup>2</sup> с орошается около 20%.

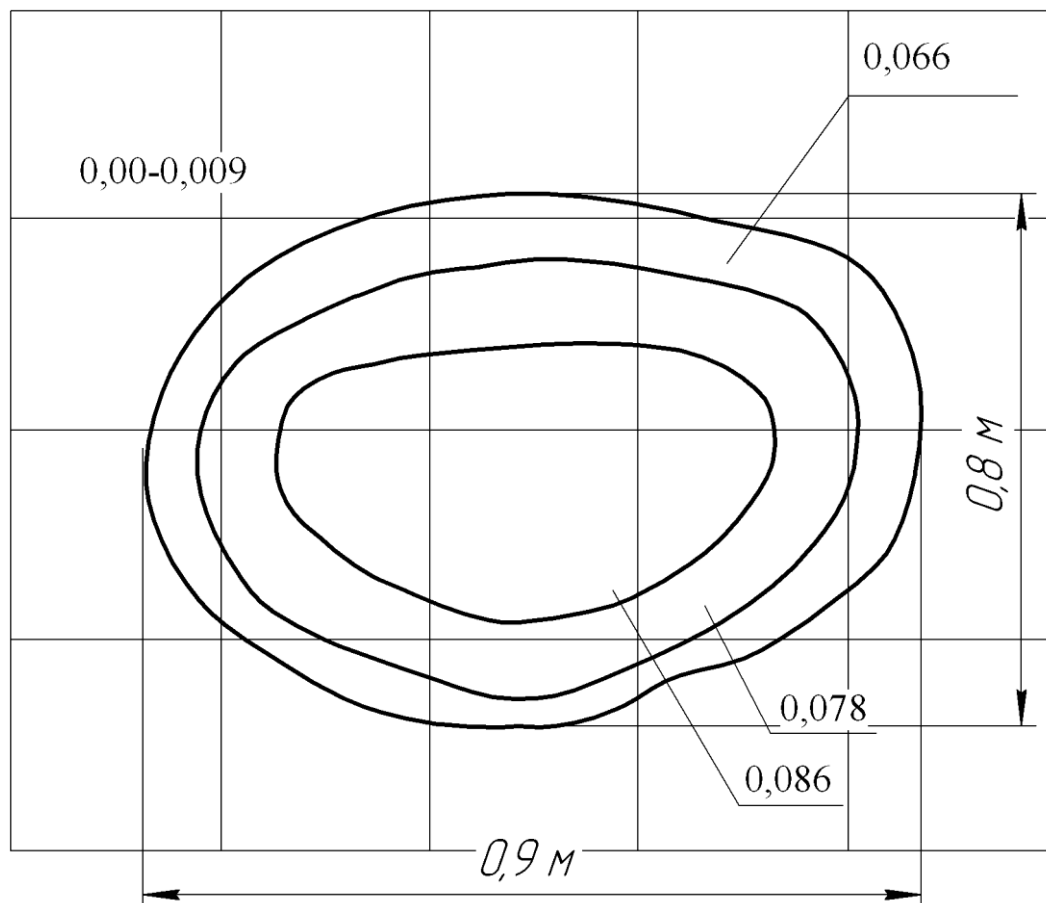


Рисунок 61– Эпюры интенсивности подачи воды из ранцевого огнетушителя распылённой струей разработанной многоструйной насадкой в режиме сжатия струи

## 8 ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУИ ВОДЯНОГО ПАРА

Результаты измерений показали, что на выходе из сопла парогенератора температура составляет порядка 75-76 °С (рис. 62) [24, 25].

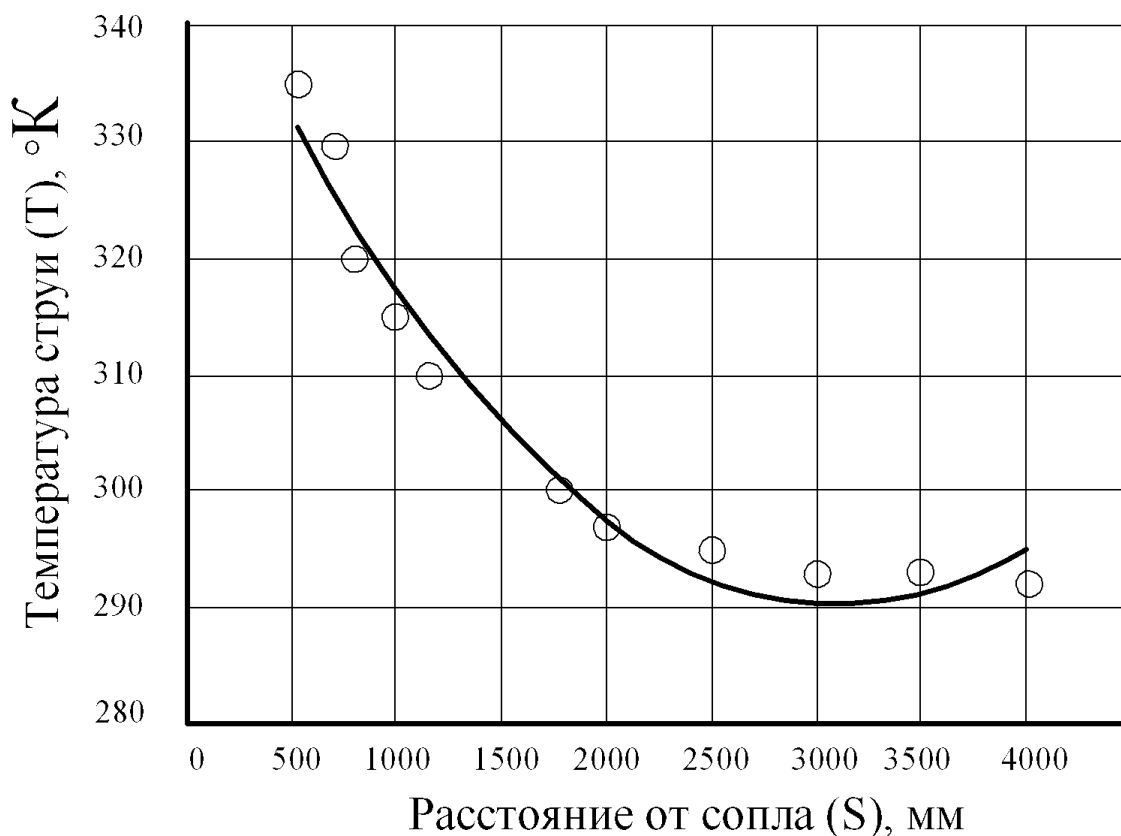


Рисунок 62—Зависимость температуры струи от расстояния от сопла парогенератора:  $T=332,1222-0,0321S+6,1453e - 6S^2$ ;  $R=0,996$ ;

Проведём сопоставление экспериментальных и расчётных значений температур. При исследовании внешних границ струи водяного пара предполагалось, что механические процессы протекают как в свободной турбулентной струе.

Было определено количество подмешанного воздуха в струю пара, рассчитывалась температура смеси пара и подмешанного воздуха в различных сечениях струи без учёта тепла, выделяющегося при конденсации:

$$T_{cmi} = \frac{c_n m_n T_n + c_b m_{bi} T_b}{c_n m_n + c_b m_{bi}}, \quad (63)$$

где  $c_b = 1,005$  кДж/(кг К) и  $c_n = 1,005$  кДж/(кг К) - соответственно теплоёмкость воздуха и водяного пара;

$$m_n = \rho_n v \omega - \text{массовый расход водяного пара, кг/с}; \quad (64)$$

$\rho_n = 5,5 \text{ кг/м}^3$  - плотность водяного пара, рассчитанная по экспериментальным данным (где скоростной напор составил 21,5 кПа, расход воды  $3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ );

$v = 88 \text{ м/с}$  - скорость истечения водяного пара;

$m_{bi} = \rho_b \Delta V_i$  - масса подмешанного воздуха;  $\rho_b = 1,205 \text{ кг/м}^3$  - плотность воздуха;

$T_b = 294,5 \text{ К}$  и  $T_n = 349 \text{ К}$  - соответственно температура окружающего воздуха и температура истекающего пара в начальном сечении струи.

Из представленных на рисунке 65 графиков видно, что расчётные и экспериментальные данные температуры струи в зависимости от расстояния

имеют расхождения. Температура, полученная экспериментальным путём, превышает расчётную.

Переохлаждённый пар в окружающем воздухе стремится к термодинамическому равновесию, конденсируется, при этом освобождается теплота, равная теплоте, необходимой для испарения сконденсировавшегося пара.

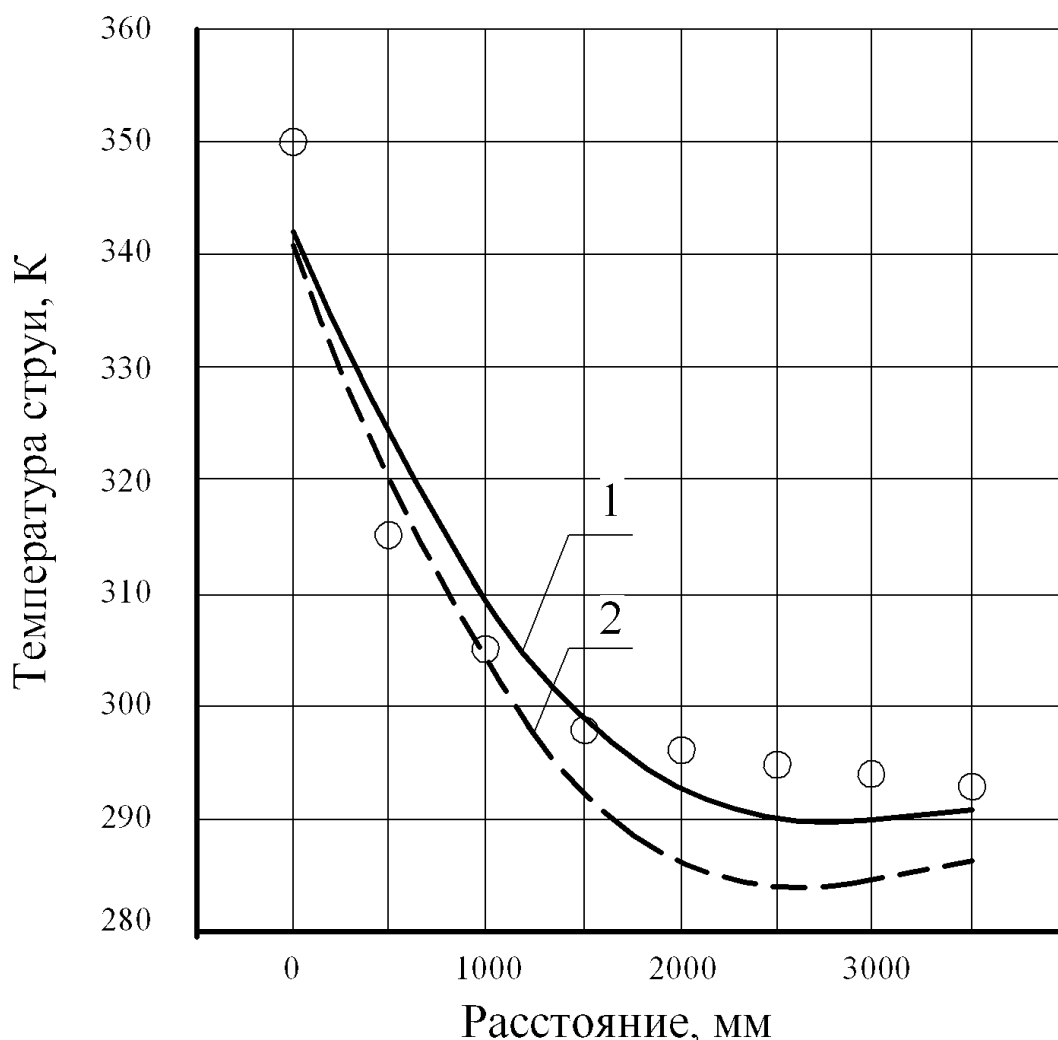


Рисунок 63 Графики экспериментальной и расчётной температур:  
1-Экспериментальная, 2-расчетная [24, 25]

По разности расчётных (без учёта конденсации пара) и измеренных температур было исследовано приращение массы конденсата по оси струи пара.

Разница между экспериментальной и расчётной температурами определялась по следующей зависимости:

$$\Delta T = T_3 - T_{cm}, \quad (65)$$

где  $T_3$  - температура струи, полученная экспериментальным путём, К;

$T_{cm}$  - температура струи, полученная расчётным путём, К.

На начальном участке струи интенсивное повышение разности измеренной температуры и расчётной свидетельствует о процессе интенсивной

конденсации водяного пара. В результате этого выделяется теплота. После точки максимума интенсивность конденсации уменьшается.

С использованием значений  $\Delta T$  по оси струи была проведена оценка массы сконденсировавшейся влаги.

Характер получившейся зависимости представлен на рисунке 65.

На выходе из сопла процентное содержание сконденсировавшейся влаги равно нулю. С удалением от сопла процентное содержание жидкой фазы возрастает.

При удалении от сечения сопла на 0,8-1,0 м происходит интенсивная конденсация пара.

Количество образовавшейся жидкой фазы увеличивается до 6,5%. При дальнейшем удалении от сопла конденсация паровой фазы невелика.

Результаты измерений ширины струи пара в зависимости от расстояния от сопла представлены на рисунке 64 [24, 25].

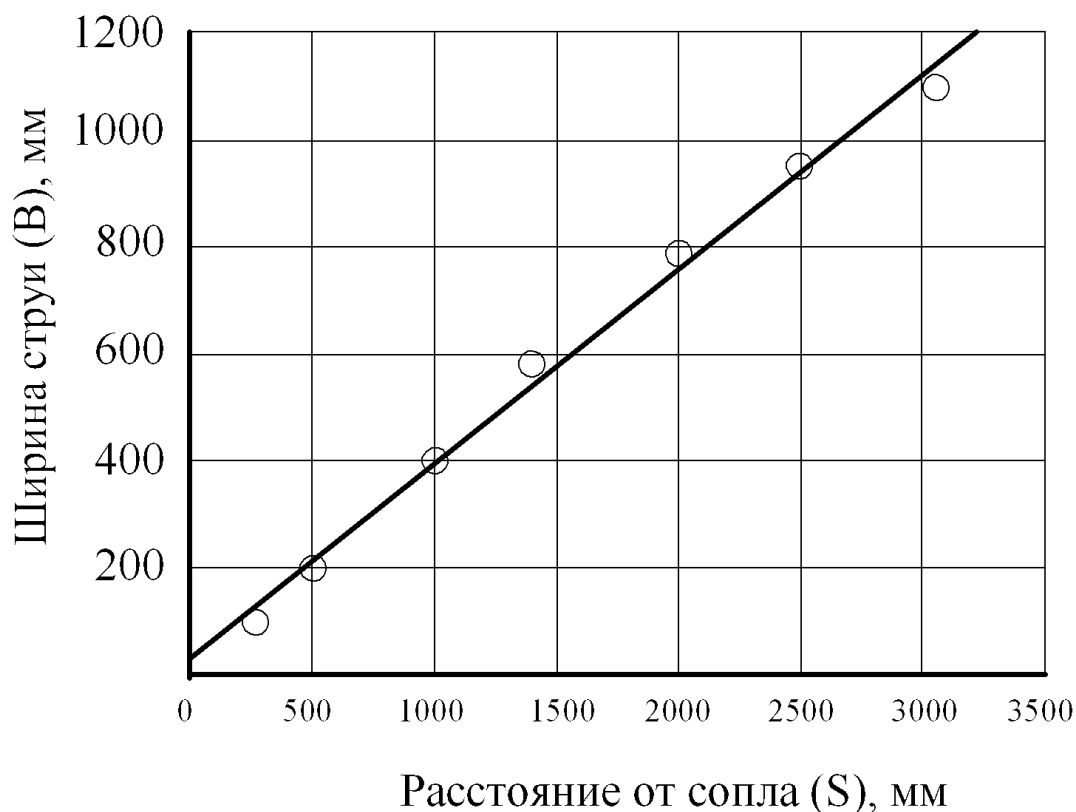


Рисунок 64– Зависимость ширины струи от расстояния от сопла парогенератора;  $B = 32,9167 + 0,3635S$ ;  $R=0,996$

Результаты измерений интенсивности светового потока, прошедшего через рассматриваемое сечение струи, были измерены по оси на расстояние до 3,5 м. По результатам измерений ослабления интенсивности излучения лазера и ширины струи были рассчитаны оптическая плотность струи пара в зависимости от удаления от выходного сопла.

Оптическая плотность струи водяного пара определялась как логарифм отношения интенсивности светового потока в воздухе к текущей

интенсивности светового потока, прошедшей через рассматриваемое сечение струи:

$$\varphi_c = \ln \frac{I_0}{I_i}, \quad (66)$$

где  $I_0$  - интенсивность светового потока до пересечения со струей пара,  $mV$ ;  $I_i$  - интенсивность светового потока, прошедшая через рассматриваемое сечение струи,  $mV$ .

На выходе из сопла парогенератора процентное содержание в паре конденсата равно нулю. С увеличением расстояния от сопла процентное содержание жидкой фракции в соотношении пар-конденсат возрастает (рис. 65). На расстоянии 0,8-1,0 м от сопла происходит интенсивная конденсация пара. Количество образовавшейся жидкой фракции увеличивается до 10 %. При дальнейшем увеличении расстояния от сопла конденсация паровой фазы снижается.

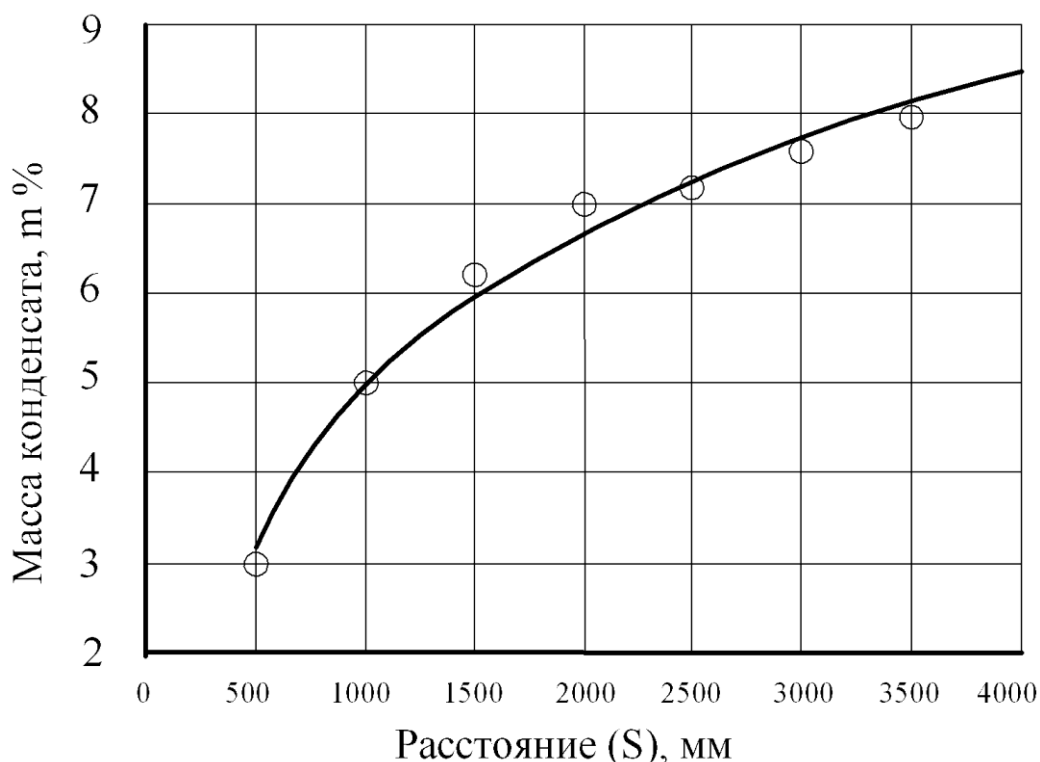


Рисунок 65 – Оценка массы конденсата в струе пара:  
 $m_{\%} = 5,8648 \log S - 12,6454$ ;  $R=0,996$ ;  $R^2=0,993$

Толщина пленки конденсата зависит от скорости перемещения источника пара (рис. 66). Расчетная эффективная скорость перемещения источника пара составляет порядка 2 км/ч.

Распределение слоя конденсата по ширине полосы увлажнения не равномерно (рис. 67). Максимальная ширина полосы увлажнения составляет около 0,8 м.

Исследовалась зависимость краевых углов смачивания от продолжительности обработки и от удаления от сопла парогенератора. Результаты представлены на рис.68.

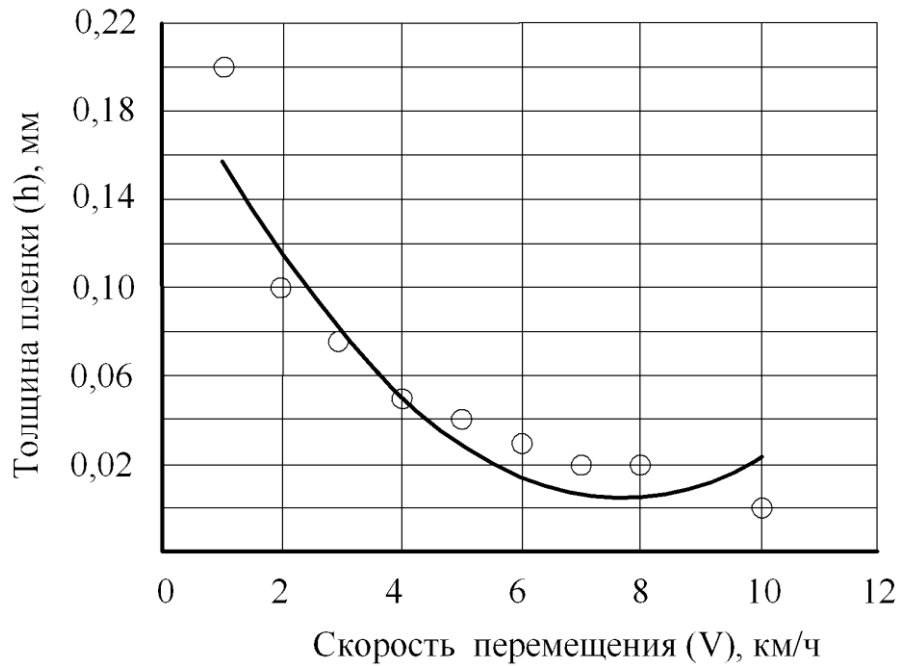


Рисунок 66 – Зависимость толщины пленки конденсата от скорости перемещения парогенератора:  $h=0,2067-0,0527V+0,0034V^2$ ;  $R^2=0,93$

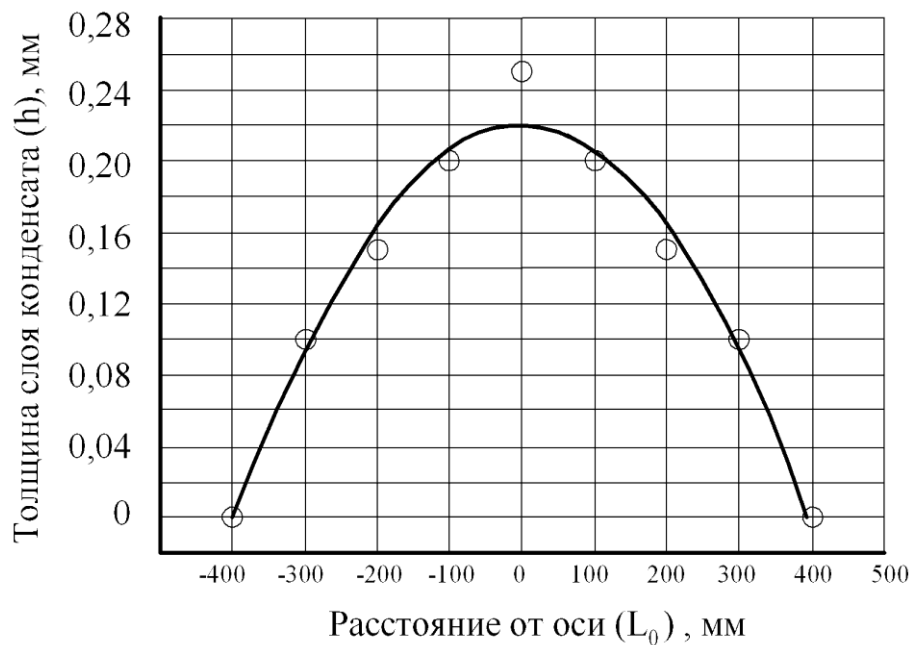


Рисунок 67 – Распределение толщины слоя конденсата по ширине опорной полосы увлажнения

$$h=0,2201+4,6293e^{-19L_0} - 0,0001 L_0^2 - 1,8378e^{-22 L_0^3}$$

$$R^2=0,95 [24, 25]$$

Результаты исследования зависимости краевых углов смачивания от продолжительности обработки и от удаления от сопла парогенератора представлены на рис. 68.

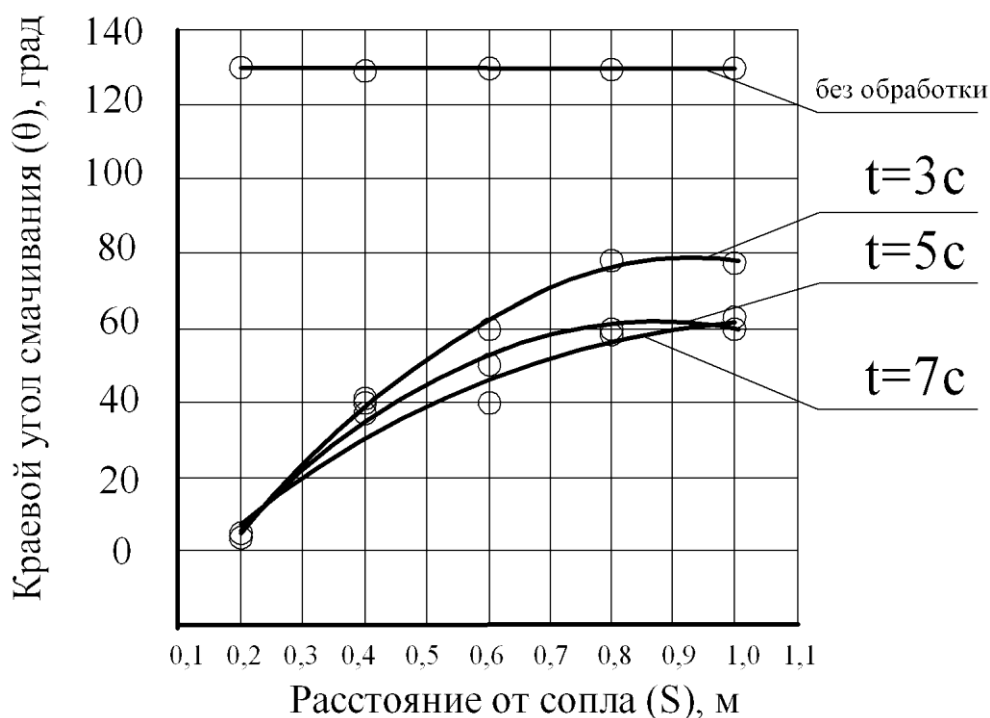


Рисунок 68 – Зависимость краевого угла смачивания от удаленности от сопла [24, 25]:

$$1 - \theta_{t=3} = -40,8 + 251,5714S - 132,1429S^2; R^2=0,95; \quad 2 - \theta_{t=5} = -32,8 + 218,6429S - 126,7857S^2; R^2=0,95; \quad 3 - \theta_{t=7} = -20,6 + 155,3571S - 73,2143S^2; R^2=0,95$$

При последующих проходах конденсация пара происходит уже не на твердой поверхности, а на пленке жидкости и капля воды растекается по обработанной поверхности с меньшим краевым углом смачивания, покрывая большую поверхность тонким слоем.

Т.е. пар может использоваться не только как самостоятельное средство, но и как средство, значительно повышающее эффективность увлажнения тонкораспыленной водой.

### Эффект увлажнения твердой поверхности

Через 10-15 минут после начала работы на твердой поверхности, параллельно оси струи, оставался «влажный» участок. Границы влажного участка с достаточной точностью характеризуются прямыми линиями, пересекающимися у сопла парогенератора. Угол между границами составляет 16-17°.



Зона мокрого следа представляет собой сильно увлажнённую поверхность, которая не высыхает более чем за 30 минут. При этом увлажняемая поверхность не соприкасалась с видимой частью струи. Область влажного следа значительно превышает ширину видимой струи пара.

$$\varphi_c = 0,153 + 0,0014S - 1,3748e - 6S^2 + 3,4777e - 10 S^3; R=0,998; \quad (67)$$

$$R^2=0,994$$

Т.е. из струи водяного пара происходит дополнительный унос влаги. Истечение водяного пара сопровождается процессами спонтанной конденсации и образованием жидкой фазы. Увлажнение твёрдой поверхности, находящейся вне пределов паровой струи, может быть объяснено циркуляционным обтеканием капель в паровом потоке.

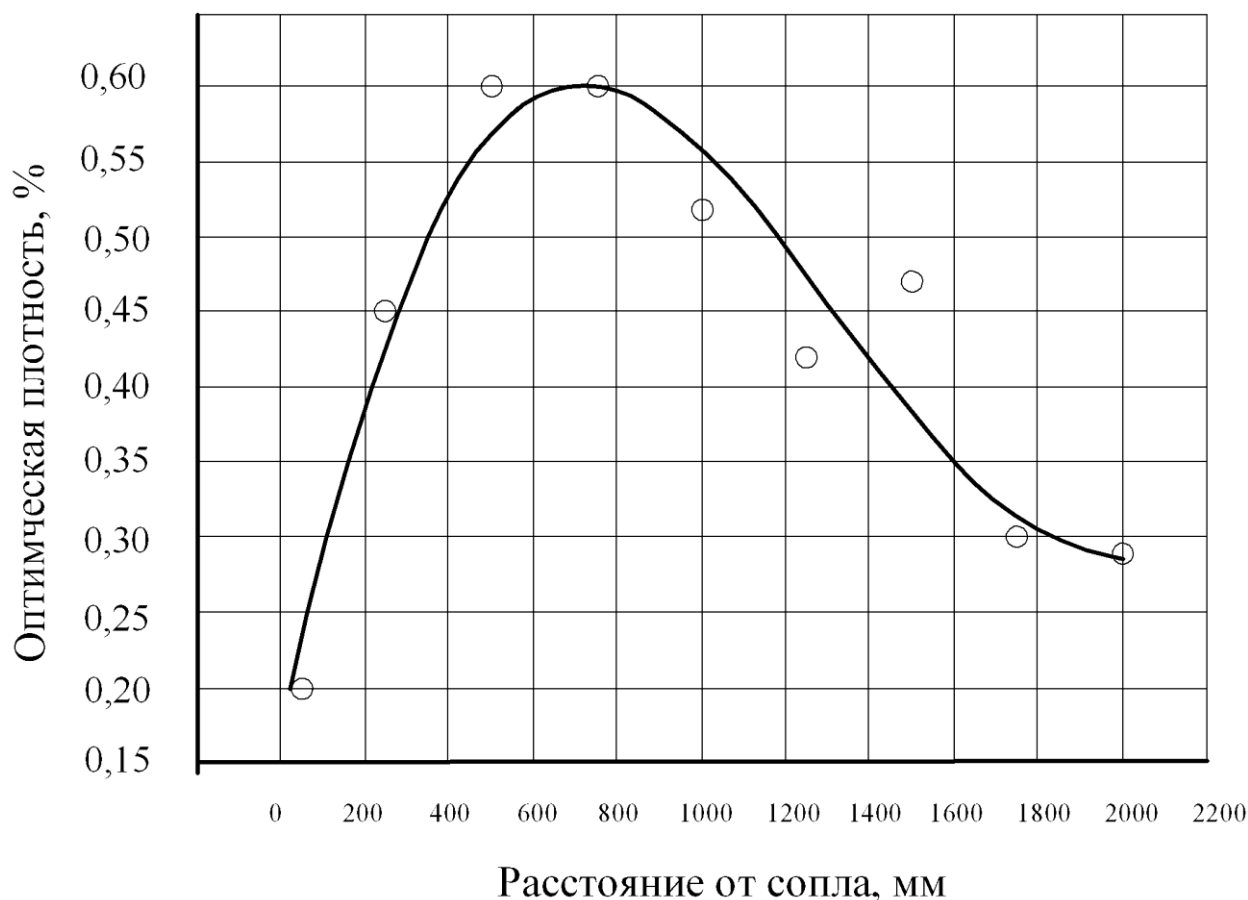


Рисунок 69- График изменения оптической плотности вдоль оси струи:  
 $\varphi_c = 0,153 + 0,0014S - 1,3748e - 6S^2 + 3,4777e - 10 S^3; R=0,998; R^2=0,994$  [24, 25]

С учётом массы сконденсировавшегося пара была определена объёмная концентрация пара в струе на различных расстояниях от сопла. Полученные данные свидетельствуют о том, что при удалении от сопла на расстояние 2 метра сохраняется огнетушащая концентрация пара в струе более 30% [24, 25].

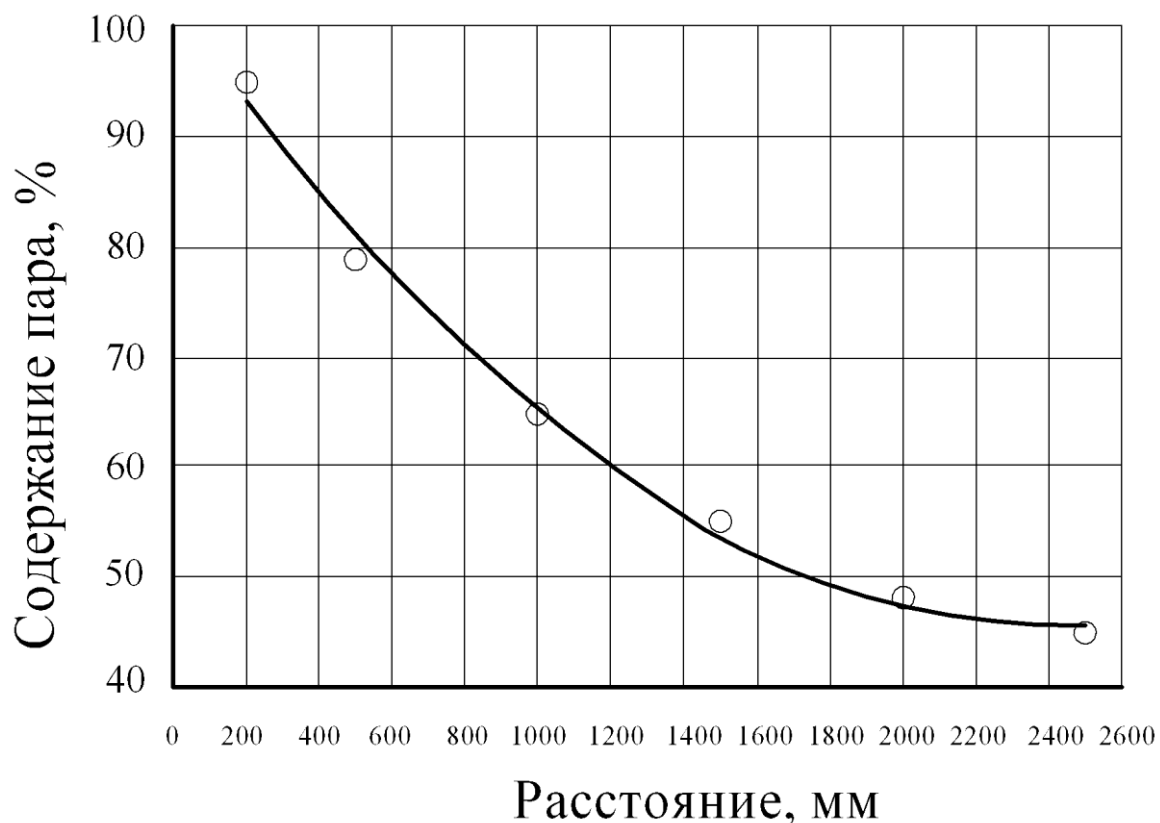


Рисунок 70- Объемное содержание пара в струе

$$V_{\%} = 102,1692 - 0,0463S + 9,478e^{-6S^2}; R^2 = 0,95 \quad (68)$$

Струя водяного пара способна экранировать инфракрасное излучение на 35-40%.

### Смачиваемость поверхности

Результаты исследования интенсивности увлажнения  $W$  элементов пористых поверхностей помещаемых на ось струи пара на различные расстояния  $L$  от сопла в диапазоне от 0,05 м до 2,5 м с интервалом 0,05 м при давлении порядка 0, 2 МПа при различных параметрах охлаждения представлены на рисунке 71.

Полученные данные свидетельствуют о том, что дополнительное охлаждение пара перед входом в сопло парогенератора способствует значительному увеличению увлажняющей способности. Наиболее значительное влияние параметры охлаждения оказывают на увлажняющую способность начального участка струи пара.

При обосновании параметров обработки струей водяного пара и технологических особенностей операции создания опорной полосы следует исходить из следующего:

1) Ширина опорной полосы повышенного влагосодержания должна составлять не менее 0,3-0,5 м;

2) Влажесодержание лесных горючих материалов в зоне опорной полосы должно достигать максимальных критических значений.

$$W=144,8912-310,4422L+154,6152 L^2 \quad R^2=0,95. \quad (69)$$

При имеющейся плотности конденсата, скорость приращения конденсата зависит от скорости перемещения парогенератора.

$$h=0,2067-0,0527V+0,0034V^2 \quad R^2=0,93. \quad (70)$$

Для достижения критического уровня влажесодержания толщина пленки конденсата должна составлять не менее 0,1 мм. Расчетная скорость перемещения источника пара составляет порядка 2 км/ч.

Получены данные о распределении слоя конденсата по ширине полосы увлажнения при различных скоростях перемещения источника пара (рис. 73).

$$h=0,2201+4,6293e^{-19L_0} - 0,0001 L_0^2 - 1,8378e^{-22 L_0^3} \quad (71)$$

$$R^2=0,95$$

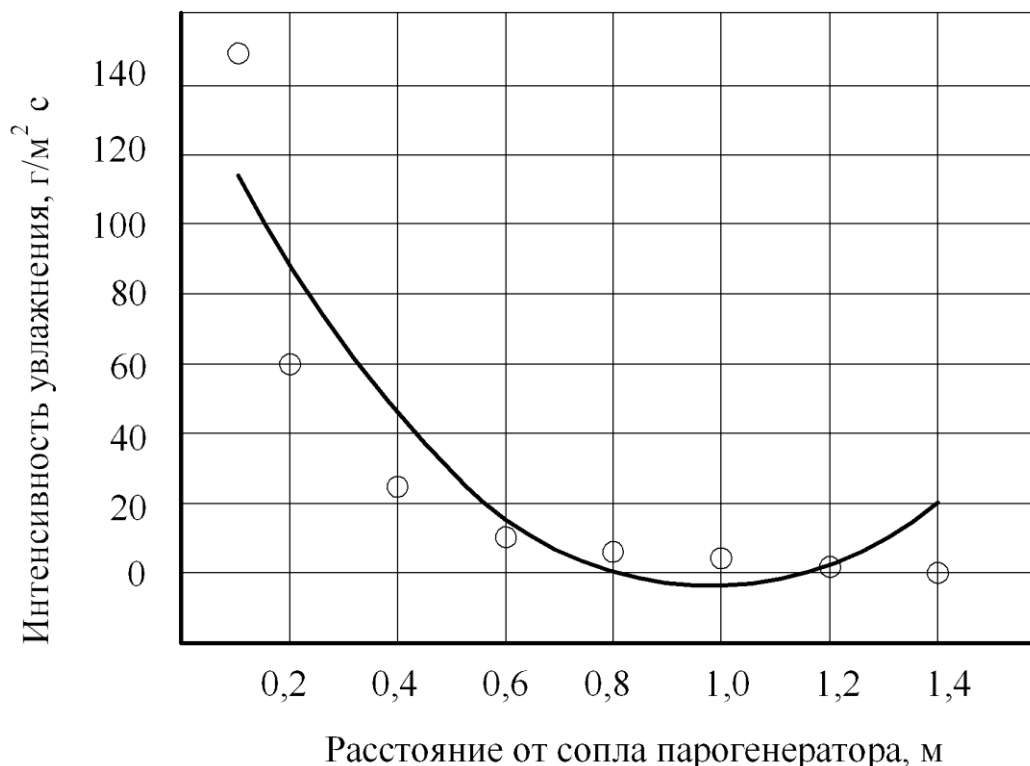


Рисунок 71 - График изменения интенсивности увлажнения вдоль оси струи [24, 25]

Т. о. сконденсировавшаяся влага распределяется неравномерно по ширине созданной полосы увлажнения.

Максимальная ширина полосы увлажнения составляет около 0,8 м, область максимального увлажнения, в которой влажесодержание лесных горючих материалов значительно превышает предельные значения, расположена в центре полосы.

Полученные данные позволяют утверждать, что:

1) Поверхность элемента лесных горючих материалов является несмачиваемой, что предопределяет неэффективность капельного увлажнения;

2) В результате взаимодействия пара с гидрофобной поверхностью увеличивается ее гидрофильность.

Последующая конденсация пара происходит уже не на поверхности твердой фазы, а на адсорбированной пленке жидкости. В связи с этим капля воды растекается по поверхности обработанного в струе пара элемента лесных горючих материалов с меньшим краевым углом смачивания, чем по абсолютно сухой поверхности.

В частности, на это указывает взаимосвязь между краевым углом смачивания и временем обработки.

Условная толщина капли в зависимости от удаления от сопла парогенератора при различной времени обработки представлены на рисунке 72.

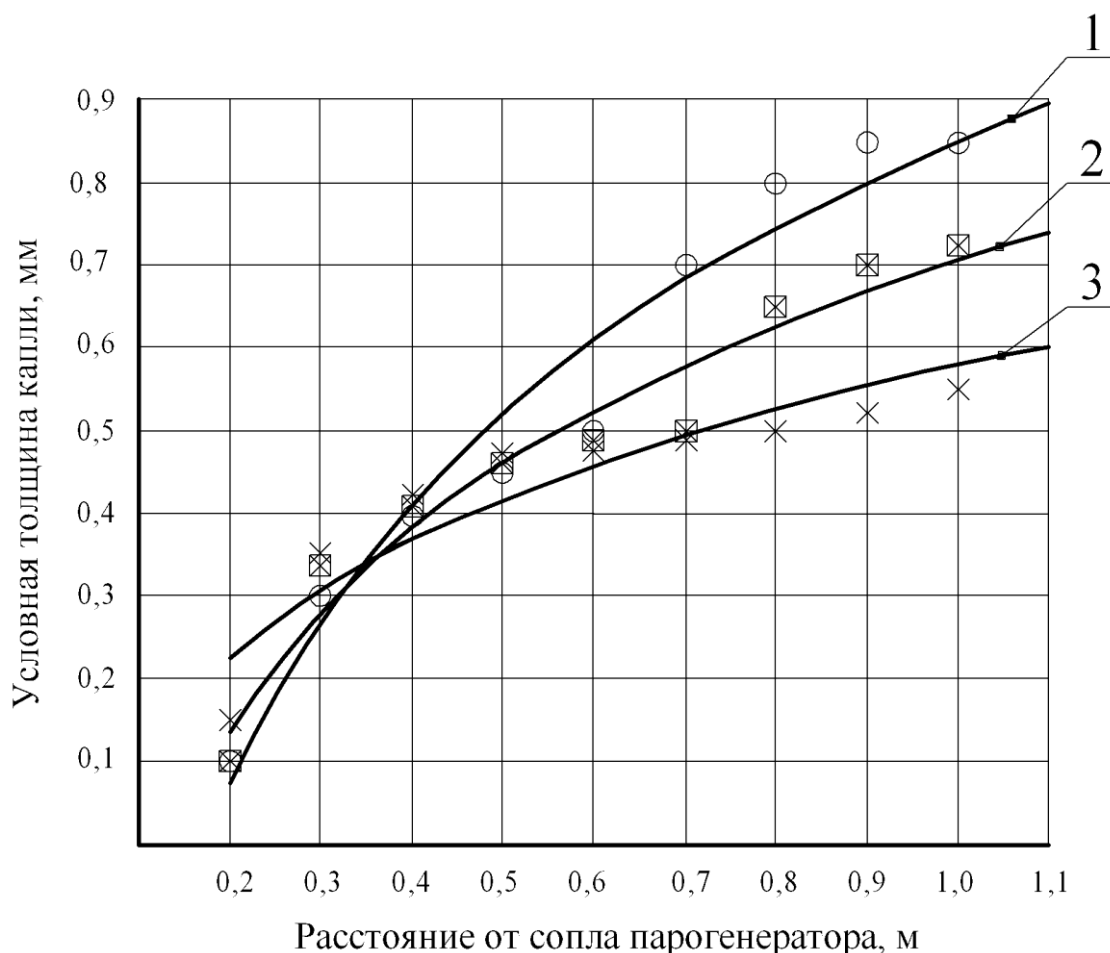


Рисунок 72 - Условная толщина капли в зависимости от удаления от сопла парогенератора: 1-  $t=7с$ , 2-  $t=5с$ , 2-  $t=3с$  [24, 25]

$$H_{t=7} = 0,853 + 1,1174 \lg(L) \quad (72)$$

$$H_{t=5} = 0,707 + 0,8166 \lg(L) \quad (73)$$

$$H_{t=3} = 0,5685 + 0,4901 \lg(L) \quad (74)$$

Представленные данные свидетельствуют о том, что после обработки поверхности струей водяного пара условная толщина капли в 3 – 25 раз меньше, чем условная толщина капли на сухом элементе лесных горючих материалов.

Учитывая практически полное растекание капли по элементу лесных горючих материалов после обработки его струей водяного пара, можно сделать вывод, что пар может использоваться не только как самостоятельное средство увлажнения, но и как средство, значительно повышающее эффективность увлажнения тонкораспыленной водой.

## **9 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУИ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ТУШЕНИИ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ**

Механизмы распространения пламени определяется в основном следующими факторами: процессами образования горючих компонентов, агрегатным состоянием горючего и его составом. В зависимости от этого будут различаться механизмы распространения пламени, а также особенности взаимодействия струи водяного пара с различными очагами горения.

Т. о. целью является - проведение оценки механизмов взаимодействия струи водяного пара с различными очагами горения.

Комбинация диффузионного горения с гетерогенным горением происходят в результате пиролиза древесины. Гетерогенное горение развивается в порах древесины, образующихся при ее пиролизе. При этом важной особенностью гетерогенного горения является возможность горения с минимальным доступом кислорода воздуха.

Различают следующие этапы пиролиза древесины.

Сушка древесины, происходящая при нагревании до температуры 120-450°C. В дальнейшем происходит выделение связанной влаги, а также разложение наименее термически стойких компонентов древесины с выделением двуокси углерода и воды [90].

При температуре 250°C происходит пиролиз древесины с выделением газов, способных к воспламенению от источника зажигания.

При температуре порядка 280-300°C начинается интенсивное разложение древесины.

При температурах 350-450°C происходит интенсивный пиролиз древесины и выделяется основная часть горючих газов. Наиболее характерной особенностью этой температурной области является ее экзотермичность. Тепловой эффект экзотермических реакций пиролиза древесины равен 750-900 кДж/кг.

При температурах 500-550°C термическое разложение древесины практически прекращается и при температуре 600°C завершается.

Максимальная температура диффузионного пламени большинства видов твердых горючих материалов органического происхождения достигает 1200-1250°C [31, 44,45, 90].

В качестве горючего материала использовали просушенные сосновые бруски древесины размерами 30x50x500 мм, имеющие следующие характеристики [46]:

### Древесина сосновая

Влажность - 9%. Плотность - 414-510 кг/м<sup>3</sup>. Теплопроводность - 0,37 Вт/(мК). Теплота сгорания - (18731-20853) кДж/кг. Показатель горючести более -2,1. Температура воспламенения -255°С [90].

Температура самовоспламенения- 399°С. Нижний концентрационный предел распространения пламени - 34 г/м<sup>3</sup>.

Опыты проводились при следующих условиях:

Температура воздуха - 20°С. Атмосферное давление - 99 кПа. Скорость ветра - не более 1,5 м/с. Влажность воздуха - 80%. Пожарная нагрузка - 5 кг/м<sup>2</sup>.

После поджога производилась выдержка в течение 5 минут. Определялся механизм взаимодействия и время прекращения горения.

При осуществлении кратковременного воздействия на очаг диффузионное горение прекращалось. Если перед началом тушения успевало развиваться гетерогенное горение, то после отведения струи пара в сторону, происходило возобновление пламенного горения.

При прекращении воздействия пара, продукты пиролиза поджигались раскаленными углями и пламенное горение возобновлялось. Тушение гетерогенного горения было возможным при длительном воздействии на угли, более десяти минут.

Выделение теплоты из зоны горения происходит в результате окисления горючих продуктов пиролиза древесины и если отвести из этой зоны некоторое количество теплоты, то горение прекратится.

При тушении пламени по механизму прекращения горения охлаждением зоны горения необходимо отвести от зоны горения примерно 10% тепла.

Теплота сгорания древесины составляет примерно 18731 кДж/кг. Соответственно для прекращения горения 1 кг древесины необходимо подать в факел пламени 1,9 кг водяного пара.

$$q_{в}^{уд} = 0,1 \cdot 18731 / 1000 = 1,9 \text{ кг}$$

Известно [44], что с одного килограмма древесины в результате пиролиза образуется 4,86 м<sup>3</sup> горючих продуктов пиролиза. Диффузионное горение горючих газов будет продолжаться при нижнем концентрационном пределе воспламенения 2,3% .

Т. о. для разбавления одного килограмма продуктов пиролиза до негорючих концентрации необходимо 206 м<sup>3</sup> водяного пара, что соответствует примерно 6,3 кг.

$$V = 4,86 \cdot 97,7 / 2,3 = 206 \text{ м}^3$$

В результате проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

-Полное прекращение горения возможно при охлаждении древесины до определенной температуры.

-Прекращение пламенного диффузионного горения не приводило к полному прекращению горения, наблюдалось гетерогенное горение -тление.

-Поверхностный слой древесины прогревался до температуры, превышающей температуру вынужденного зажигания, т.е. выше  $t=500-600^{\circ}\text{C}$ .

-После прекращения пламенного горения повторно наблюдалось воспламенение древесины и продолжение горения.

Поэтому условием прекращения горения древесины является прекращение пламенного горения и охлаждение углей, образовавшихся при горении до температуры ниже температуры пиролиза, т.е. ниже  $200^{\circ}\text{C}$ , рис. 73.



Рисунок 73 - Воздействие струи водяного пара на горящие бруски древесины

Продукты гетерогенного горения создают потоки выделяющегося высокотемпературного газа, не позволяющего охладить древесину в глубине слоя. Следовательно, воздействие струей водяного пара на очаги тления неэффективно.

Изоляция гетерогенного горения от кислорода окружающего воздуха с использованием струи пара не эффективна. Воздействие струи пара приводит к увеличению интенсивности гетерогенного горения, за счет притока свежего кислорода воздуха.

Т. о. проведенные исследования возможных механизмов тушения струей водяного пара горящих брусков древесины показало следующее:

- Охлаждение диффузионного факела пламени. При этом необходимый расход пара составляет 1,9 кг на один килограмм древесины.

- Охлаждение самого горючего материала затрудняется наличием гетерогенного горения.

- Механизм изоляции горючих газов от кислорода окружающего воздуха приводит только к прекращению диффузионного горения.

- Расход водяного пара, необходимый для разбавления газообразных продуктов пиролиза образующихся с одного килограмма древесины, составляет 6,3 кг.

- Сдув факела пламени с использованием струи водяного пара неэффективен.

Таким образом область применения метода должна быть ограничена воздействием на переднюю кромку пожара (зоны пиролиза и горения). Воздействие на зону догорания будет неэффективным.

### **Горение сложной системы, имеющей сильно развитую поверхность**

Т.е. это горение тонких веточек и травы, рис. 74.

Известно [92], что в передней части фронта лесного пожара сгорают опавшие листья, хвоя, трава, тонкие сучья и ветки.

В качестве горючего материала использовалась сухая трава, обладающая следующими пожароопасными характеристиками [92]:

влажность 7,3 % ; теплота сгорания - 16652,32 кДж/кг; температура тления 204°C; нижний концентрационный предел распространения пламени 200 г/м; минимальная энергия зажигания 260 мДж; температура воздуха составляла 20°C; атм. давление 99 кПа; скорость ветра до 1-2 м/с; влажность воздуха 10%; запас сухой травы оценивался 1,1 кг/м .

Характеристики горения:

Длина передней кромки фронта пожара - в среднем 30 м; высота пламени до 0,5 м. Фронт пожара как правило распространялся по направлению ветра со скоростью 0,02-0,04 м/с.

Ширина фронта 0,3-0,5 м.





Рисунок 74- Воздействие струи водяного пара на фронт низового лесного пожара

Воздействие струи пара на очаг горения приводило к уменьшению пламенного горения.

Полное прекращение горения осуществлялось в зоне непосредственного воздействия струи - до 2,5 метров от сопла.

Максимальный результат тушения был при воздействии струей пара под углом  $30^\circ$  к поверхности земли. Эффективная скорость перемещения оператора вдоль передней кромки фронта пожара - 20 м/мин.

Воздействие струи водяного пара на переднюю кромку фронта низового лесного пожара приводит к прекращению пламенного горения, по механизмам прекращения диффузионного факела пламени.

Теплотворная способность одного килограмма сухой травы в среднем составляет 16652 кДж/кг.

Т. о. одного килограмма водяного пара достаточно для отведения 1000 кДж/кг тепла.

Для тушения одного килограмма лесных горючих материалов по механизму охлаждения факела пламени необходимо  $q_{в}^{уд} = 0,1 \cdot 16652 / 1000 = 1,7$  кг водяного пара.

С одного килограмма лесных материалов в результате термического разложения образуется  $3,99 \text{ м}^3$  газообразных горючих продуктов пиролиза. Диффузионное горение горючих газов в воздухе может продолжаться при их концентрации не менее 2,3%.

Для разбавления продуктов пиролиза, образующихся с одного килограмма лесных материалов необходимо  $V = 3,99 \cdot 97,7 / 2,3 = 169 \text{ м}^3$  водяного пара, т.е. 5,1 кг.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости краевого угла смачивания от продолжительности обработки водой и водными растворами со смачивателем и расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности в режиме распыленной струи для стандартной и разработанной распыливающей насадки.

Полученные данные свидетельствуют о том, что поверхность ЛГМ является практически не смачиваемой и обработка водой без смачивателя низкоэффективна и требует большей интенсивности. При обработке поверхности ЛГМ водным раствором со смачивателем краевой угол меньше, чем при обработке водой и уменьшается при увеличении времени обработки.

Исследования противопожарных характеристик струи водяного пара показали, что на выходе из сопла парогенератора температура составляет порядка  $75-76^\circ\text{C}$ .

При удалении от сечения сопла на 0,8-1,0 м происходит интенсивная конденсация пара.

Были проведены исследования ширины струи пара и оптическая плотность струи пара в зависимости от удаления от выходного сопла.

Распределение слоя конденсата по ширине полосы увлажнения не равномерно. Максимальная ширина полосы увлажнения составляет около 0,8 м.

Представленные экспериментальные исследования подтверждают эффективность распыленной воды и пара как самостоятельных огнетушащих средств, так и средства создания опорных полос.

При обосновании параметров обработки струей водяного пара и технологических особенностей операции создания опорной полосы следует исходить из следующего:

С учётом массы сконденсировавшегося пара была определена объёмная концентрация пара в струе на различных расстояниях от сопла. Полученные данные свидетельствуют о том, что при удалении от сопла на расстояние 2 метра сохраняется огнетушащая концентрация пара в струе более 30%.

Для достижения критического уровня влагосодержания толщина пленки конденсата должна составлять не менее 0,1 мм. Расчетная скорость перемещения источника пара составляет порядка 2 км/ч.

Снижение концентрации пара приводит к увеличению содержания кислорода воздуха в струе. Понижение скорости струи пара до 1,5 м/с уменьшает охлаждающую способность струи. Расход пара должен составлять не менее 1,7 кг на один килограмм лесных горючих материалов.

Механизм охлаждения горючих лесных материалов возможен, при отсутствии гетерогенного горения.

Механизм изоляции факела пламени от кислорода воздуха приводит к прекращению только пламенного горения.

Для разбавления горючих продуктов пиролиза выделяющегося с одного килограмма лесных горючих материалов, до негорючих концентраций, необходимо подать 5,1 кг водяного пара.

Сдув факела пламени с применением этого метода невозможен.

Водяной пар является эффективным средством для ликвидации пламенного вида горения, но неэффективным средством для борьбы с гетерогенным (беспламенным) горением.

## **10 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА С ИМЕЮЩИМИСЯ СРЕДСТВАМИ И МЕТОДАМИ ПРИ БОРЬБЕ С НИЗОВЫМИ ЛЕСНЫМИ И СТЕПНЫМИ ПОЖАРАМИ**

Скорость распространения фронта пламени низового лесного пожара зависит от ряда факторов:

- состава лесных горючих материалов, их структуры и влагосодержания;
- влагосодержания почвенного покрова;
- параметров окружающей среды;
- рельефа местности.

Необходимо провести сравнительные испытания эффективности тушения струей водяного пара и струей распыленной воды с диаметром капель 2-3 мм.

Для получения распыленной воды использовали ранцевый лесной опрыскиватель (РЛО-6М), поскольку устройство является наиболее распространенным.

При использовании ранцевого опрыскивателя продолжительность тушения не превышала пяти минут, после чего оператору требовался отдых порядка 15-20 минут, во время которого производилась зарядка огнетушащим веществом.

Тушение происходило со скоростью 16-18 м/мин. Полученные экспериментальные данные по скорости и продолжительности тушения качественно согласуются с данными, приведенными в [26].

При тушении паром скорость тушения достигала 18-22 м/мин. Продолжительность тушения без дозаправок составляла не менее 25 минут. На дозаправку парогенератора и вывод его на рабочий режим требовалось 20-25 минут.

С учетом необходимости дозаправки водой и отдыха оператора реальная скорость тушения составила:

- тушение с использованием РЛО - 4,5-5 м/мин;
- тушение с использованием парогенератора - 9-10 м/мин.

Предлагаемый метод является практически таким же эффективным, как и тушение с использованием ранцевого лесного опрыскивателя. При этом, расход воды в 20 раз меньше, чем при применении известного метода, табл. 14.

Время, затрачиваемое рабочими на один цикл - от одной зарядки до другой, можно рассчитать по следующей зависимости:

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{п}} + T_{\text{з}} + T_{\text{т}}, \quad (75)$$

где  $T_{\text{п}}$  - время на переходы от пункта зарядки до пожара, мин;  $T_{\text{з}}$  - время на зарядку оборудования, мин;  $T_{\text{т}}$  - время тушения, мин.

Предельное время непрерывной работы ранцевого лесного опрыскивателя при одной зарядке водой составляет пять минут. Производительность - до 18 м/мин. Время, необходимое для отдыха и дозаправки - порядка 10 мин.

Время непрерывной работы с парогенератором, полученное по хронометражным данным, составляет 25 мин. Скорость тушения - 20 м/мин. Время на дозаправку - 15 мин.

Протяженность потушенной кромки, м, за один цикл можно определить по следующей зависимости:

$$L_{\text{м.п}} = V_{\text{м}} \cdot \tau_{\text{ц}} \quad (76)$$

где  $V_{\text{м}}$  - действительная скорость тушения, м/мин;  $\tau_{\text{ц}}$  - продолжительность тушения в течение одного цикла, мин.

Средняя скорость тушения, м/мин, учитывающая время на переходы от пункта зарядки до пожара и обратно определяется:

$$V_{\text{м.ц}}(L_{\text{п}}) = L_{\text{м.п}} / \tau_{\text{ц}} \quad (77)$$

где  $L_{\text{м.п}}$  - протяженность потушенной кромки пожара, м;

$L_{\text{п}}$  - расстояние от места зарядки до пожара, м.;

$\tau_{\text{ц}}$  - время, затрачиваемое на цикл, мин.

Таблица 14- Тактико-технические характеристики средств борьбы с низовыми лесными пожарами

Средства и методы борьбы с низовым лесным пожаром	Скорость тушения, м/мин	Расход огнетушащих средств	Продолжительность работы до заправки, мин	Расход воды на тушение 1 метра кромки пожара, л/м	Протяженность потушенной кромки фронта пожара за 1 цикл, м	Стоимость тушения 100 м кромки фронта пожара (с учетом зарядки, отдыха), руб
1. Метод захлестывания свежесрубленными ветками	4	-	-	-	-	19
2. Засыпка кромки лесного пожара грунтом	1	-	-	-	-	75
3. Ранцевый лесной опрыскиватель (18л)	16-18	0,06 л/с	5	0,2	85	15
4. Генератор водяного пара (6 л)	18-22	0,003 л/с	25	0,01	500	10,5

В зависимости от расстояния от пункта зарядки до пожара изменяется время, затрачиваемое на переходы.

По хронометражным данным время, затрачиваемое на переходы для оператора, вооруженного парогенератором и опрыскивателем, примерно одинаково (таблица 15).

Таблица 15- Хронометраж на переходы

Расстояние от места зарядки до пожара, м	100	200	300	400	500	600	700
Затрата времени на переходы, мин	10	15	20	25	30	35	40

$$V_{\text{ран}} = 3,8667 - 0,0011L - 1,2121e - 6L^2. \quad (78)$$

$$V_{\text{пар}} = 10,1 - 0,0057L + 9,0909e - 7L^2. \quad (79)$$

Т. о. производительность тушения зависит от расстояния от места заправки до пожара и применяемого метода тушения. При этом с увеличением расстояния от места заправки до пожара разница производительности парогенератора в 2,5-3,7 раз выше производительности ранцевого опрыскивателя. Для определения экономической эффективности использования парогенератора и ранцевого лесного опрыскивателя, определим площадь сохраненного участка, рис.75.

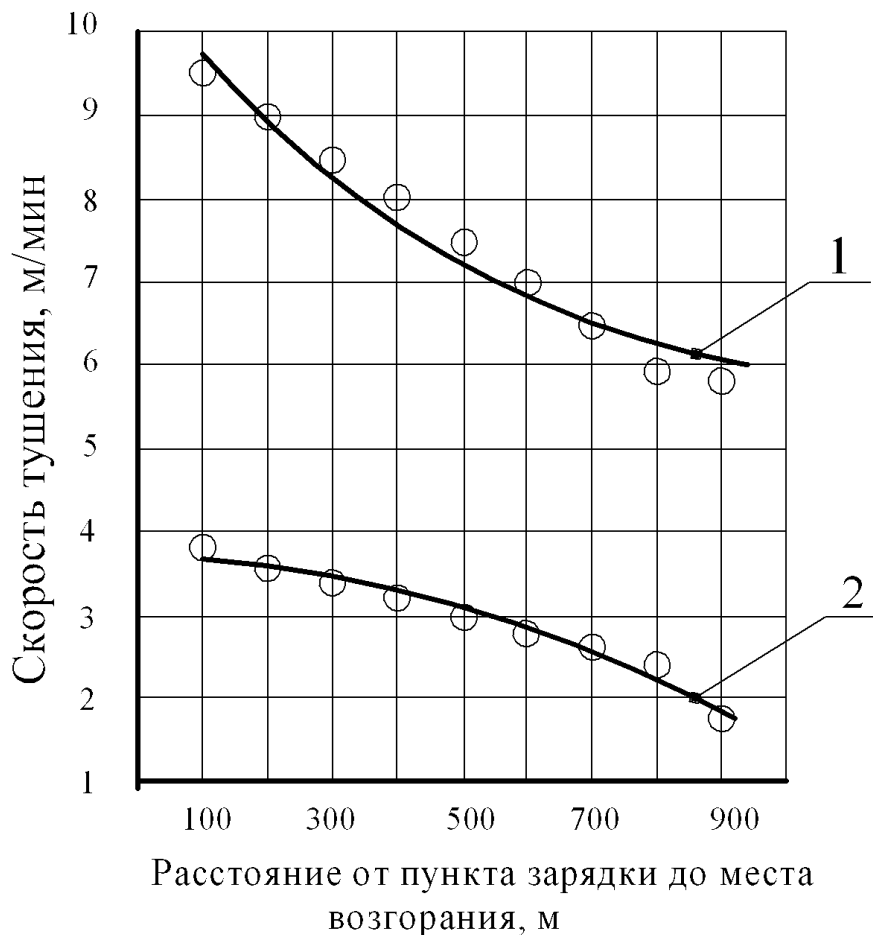


Рисунок 75- Скорости тушения парогенератором и ранцевым  
Опрыскивателем 2-  $V_{РАН} = 3,8667 - 0,0011L - 1,2121e - 6L^2$   
1-  $V_{ПАР} = 10,1 - 0,0057L + 9,0909e - 7L^2$  [24, 25]

Влажность горючих материалов - 10%, а скорость ветра - 1,5 м/с.

Скорость увеличения протяженности кромки пожара - 7,5 м/мин.

В результате протяженность кромки пожара (L) при времени свободного горения 3 часа к моменту прибытия пожарных подразделений составит 1350 м.

Скорость увеличения протяженности кромки пожара 7,5 м/мин больше скорости тушения пожара 3,6 м/мин. Потушить такой пожар возможно при одновременном использовании более трех ранцевых опрыскивателей, таблица 16.

Таблица 16- Характеристики технологии тушения

Скорость ветра м/с	Влажность горючих материалов, %	Протяженность кромки пожара, м, в зависимости от продолжительности горения, ч					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,0	10	70	140	210	280	350	420
0,5		80	160	240	320	400	480
1,0		160	320	480	640	800	960
1,5		225	450	675	900	1125	1350
0,0	20	50	100	150	200	250	300
0,5		65	120	180	240	300	360
1,0		85	170	255	340	425	510
1,5		165	330	495	660	825	990
0,0	30	35	70	105	140	175	210
0,5		40	80	120	160	200	240
1,0		50	100	150	200	250	300
1,5		65	130	195	260	325	390

Таблица 17 – Характеристики пожара

Скорость ветра м/с	Влажность горючих материалов, %	Протяженность кромки пожара, м, в зависимости от продолжительности горения, ч					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,0	10	70	140	210	280	350	420
0,5		80	160	240	320	400	480
1,0		160	320	480	640	800	960
1,5		225	450	675	900	1125	1350
0,0	20	50	100	150	200	250	300
0,5		65	120	180	240	300	360
1,0		85	170	255	340	425	510
1,5		165	330	495	660	825	990
0,0	30	35	70	105	140	175	210
0,5		40	80	120	160	200	240
1,0		50	100	150	200	250	300
1,5		65	130	195	260	325	390

Производительность тушения тремя опрыскивателями

$P_{PO} = 3,6 \cdot 3 = 10,8$  м/мин,

а тремя парогенераторами  $P_{ПГ} = 9 \cdot 3 = 27$  м/мин.

Продолжительность тушения при использовании того или иного метода тушения определялась по выражению:

$$L + V_P \cdot \tau_{mn} - V_{мц} \cdot \tau_{mn} = 0 \quad (80)$$

В результате:

-для РЛЮ  $\tau_{mn} = 6,8$  ч - звеном пожарных из трех человек с парогенераторами;

-для парогенератора  $\tau_{mn} = 1,1$  ч - звеном пожарных из трех человек с ранцевыми опрыскивателями.

Таким образом, при использовании парогенераторов время необходимое для тушения, на 5,7 часа меньше, чем при использовании опрыскивателей.

Для определения эффективности использования разработанного устройства необходимо определить площадь сохраненного леса.

За 5,7 часа протяженность кромки пожара может увеличиться на 2565 м. Приняв, что сохраненный лесной массив примет форму окружности, можно определить его площадь:

$$S_n = \Delta L_K^2 / 4\pi, \quad (81)$$

В результате получается площадь порядка 52 га.

### Косвенное тушение водяным паром

В результате проведенных исследований были рекомендованы две технологические схемы косвенного тушения с использованием водяного пара:

В первой из предложенных схем предполагалось создание опорной полосы только струей водяного пара.

Во второй схеме создание опорной полосы производится при помощи пара и воды, таблица 18.

Таблица 18 – Показатели эффективности косвенного тушения

Показатель	Водяной пар	Пар и вода
Скорость тушения, км/ч	1-1,5	2,5-3
Масса воды, используемой на создание метра опорной полосы, кг/м	0,02	0,1

Технология 1. Два оператора, снабженных парогенераторами, производят увлажнение от одной точки, двигаясь одновременно в противоположные стороны со скоростью 1-1,5 км/ч. Одновременно с увлажнением производится зажигание напочвенного слоя по самому краю только что созданной опорной полосы.



За час тушения бригадой из 4 человек создается полоса отжига протяженностью 2-3 км. Количество воды, расходуемой на создание одного метра полосы увлажнения, составляет 0,02 кг/м.

Технология 2. Создание опорной полосы производится паром и тонкораспыленной водой.

В отличие от первой технологической схемы скорость перемещения оператора составляет 2,5-3 км/ч. При этом расход воды на увлажнение увеличивается примерно в 5 раз по сравнению с первой технологической схемой.

Тактика тушения низовых лесных пожаров предусматривает прекращение пламенного горения со скоростью продвижения по передней кромке фронта пожара от 18 до 25 м/мин. Струя пара должна подаваться на переднюю кромку фронта пожара под углом  $30^\circ$  к поверхности земли и  $30^\circ$  к очагу горения. Данный угол обеспечивает уноса газообразных горючих продуктов.

При ликвидации низовых лесных пожаров применяемые для тушения силы и средства могут сосредотачиваться следующим образом [92]:

- Одновременно по всему периметру пожара. Если имеется большое количество сил и средств.

- На фронте пожара с последующим продвижением на фланги и тыл. При небольшом количестве сил и средств.

- В тылу пожара с последующим продвижением по флангам к его фронту. В случае если перед фронтом пожара имеется преграда дальнейшему распространению горения.

- С флангов с постепенным продвижением к фронту пожара.

Сравнительный анализ эффективности применения парогенератора с ранцевым лесным опрыскивателем (РЛО-6М) показал что время необходимое для тушения парогенератором на 5,7 часа меньше, чем при использовании стандартных опрыскивателей РЛО-6М.

Были разработаны косвенные схемы тушения водяным паром.

Тактика тушения низовых лесных пожаров предусматривает прекращение пламенного горения со скоростью продвижения по передней кромке фронта пожара от 18 до 25 м/мин.

В результате сравнительных испытаний методов тушения фронта низового лесного пожара использование водяного пара имеет следующие преимущества:

- при продолжительной работе оператора средняя скорость тушения выше, чем при применении базовых методов;

- расход воды, затрачиваемой на тушение, в 20 раз меньше, чем струи воды с диаметром капель 2-3 мм.

## Заключение

Основная причина возникновения лесных пожаров связана с хозяйственной деятельностью людей. В районах интенсивного ведения лесного хозяйства возникает около 85-90 % лесных пожаров.

Успех борьбы с лесными и торфяными пожарами во многом зависит от их своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по их ограничению и ликвидации.

Способы тушения жидкими огнетушащими веществами нашли широкое применение из-за доступности и низкой стоимости огнетушащих веществ. Наиболее широко используются вода и её растворы.

Однако тушение водой лесных пожаров является не самым эффективным способом из-за высокой интенсивности подачи воды и большого расхода. Для повышения огнетушащей эффективности в воду вводят добавки, повышающие смачивающую способность или обеспечивая подачу её в очаг пожара в распылённом виде.

Широкое применение нашли способы тушения горючих материалов двухфазными струями или паром, что позволяют эффективно воздействовать на зону горения с помощью малого количества огнетушащих веществ. Применение пара позволяет в значительной мере сэкономить жидкие огнетушащие вещества и после удаления пара лесные горючие материалы не поддерживают горение, пар обладает хорошей проникающей способностью, что позволяет тушить им в труднодоступных местах.

Проведенные исследования характеристик струи водяного пара, влияющие на эффективность тушения показали, что:

- Концентрация пара в воздухе, равная 35% считается достаточной для прекращения горения.

- Один литр ( $0,001 \text{ м}^3$ ) перегретой воды образует водяной туман объемом  $1,3-1,5 \text{ м}^3$  с размером капель воды  $10-50 \text{ мкм}$  (суммарный объем капель составляет от  $0,5$  до  $0,7$  литров).

- Большая площадь поверхности капель и температура водяного тумана, обеспечивают быстрое испарение воды и понижение температуры в зоне горения, а также увеличение объема пара.

- Температура пара на всем протяжении струи ниже температуры конденсации.

- Снижение концентрации пара приводит к увеличению содержания кислорода воздуха в струе. Понижение скорости струи пара до  $1,5 \text{ м/с}$  уменьшает охлаждающую способность струи. Расход пара должен составлять не менее  $1,7 \text{ кг}$  на один килограмм лесных горючих материалов.

- Струя пара способна экранировать инфракрасное излучение на  $35-40 \%$ . поверхность ЛГМ является практически не смачиваемой и обработка водой без смачивателя низкоэффективна и требует большей интенсивности. При обработке поверхности ЛГМ водным раствором со смачивателем краевой угол меньше, чем при обработке водой и уменьшается при увеличении времени обработки.

С уменьшением расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности краевой угол также уменьшается.

Струя водяного пара является эффективным средством для ликвидации пламенного вида горения, но недостаточно эффективным для борьбы с гетерогенным горением.

В результате сравнительных испытаний методов тушения фронта низового лесного пожара использование водяного пара имеет следующие преимущества:

- при продолжительной работе оператора средняя скорость тушения выше, чем при применении базовых методов;
- расход воды, затрачиваемой на тушение, в 20 раз меньше, чем струи воды с диаметром капель 2-3 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров/ И. М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: Наука, 1980. – 255 с.
2. Анализ происшествий, аварий и чрезвычайных ситуаций на территории Саратовской области в 2016 г. Главное управление МЧС России по Саратовской области. Центр мониторинга, прогнозирования и предупреждения ЧС Саратовской области. 2016. – 74 с.
3. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2007. – 153 с.
4. Боровиков В. П. Statistica: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.
5. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 159с.
6. Виноградов А. Г., Яхно О.М. Расчет параметров противопожарных струй распыленной воды. Прикладна гідромеханіка. 2015. Том 17, N 4. С. 3 – 13.
7. Главацкий Г.Д Особенности организации тушения крупных лесных пожаров в многолесных районах Сибири / Т.Д. Главацкий, В.М. Груманс // Вестник МГУЛ: Лесной вестник. – 2001. – №2. – С. 45–55.
8. Главацкий Г.Д. Особенности тактики тушения лесных пожаров в многолесных районах Сибири / Г.Д. Главацкий, В.М. Груманс // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – 2001. – №5. – С. 23–37.
9. Главацкий Г.Д. Применение воздуходувок ВЛП-2,5 на тушение лесного пожара / Г.Д. Главацкий, Г. Филимлнов // Лесное хозяйство. –1996. – № 3. –С. 27-28.
10. Гоман П.Н., Соболев В.Р., Баровик Д.В. Экспериментально-численное моделирование процесса горения и распространения огня в условиях лесного низового пожара / Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (<http://ipb.mos.ru/ttb>) Выпуск № 3 (37) – июнь 2011 г.
11. Гришин АМ. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. –407с.
12. Гришин А.М. Физика лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 218 с.

13. Гришин А. М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара / А. М. Гришин // ФГВ. – 1989. – №6. С. 72-79.
14. Груманс В.М. Особенности организации и тактики тушения крупных лесных пожаров (КЛП): На примере Красноярского Приангарья: дис. ... канд. с.-х. наук. – Красноярск, 1999. – 222 с.
15. Гундар С.В. Ресурсное обоснование сил и средств для тушения низового лесного пожара / С.В. Гундар, М.М. Данилов, А.Н. Денисов, И.Д. Опарин Интернет – журнал «Технологии техносферной безопасности» (<http://ipb.mos.ru/ttb>). Выпуск №2 (43) – апрель 2012 г.
16. Гусев В. Г. Лесопирологические основы, методы и средства создания противопожарных барьеров в сосновых лесах и космический мониторинг их эффективности: дис. д-ра тех. наук. – Санкт-Петербург, 2006. – 330с.
17. Гутер Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опытов / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Физматгиз, 1970. – 432 с.
18. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. Том.1,2 / Пер. с англ. Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 510 с.
19. Дружинин В.С. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / В.С. Дружинин, А.В. Сикан. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2001. –169 с.
20. Зайцев А.М. К вопросу о возникновении лесных пожаров вследствие самовозгорания лесной подстилки / А.М. Зайцев, С.В. Губский // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. №4 (21). –22 с.
21. Зажигаев Л. С. Методика планирования и обработка физического эксперимента / Л.С. Зажигаев. – М.: Атомиздат, 1978. – 170 с.
22. Журавлева Л.А. Лесные пожары. Состояние и проблемы в Российских лесах. / Л.А. Журавлева // Техносферная безопасность: наука и практика. Межд. науч.- практич. конференция. – Саратов, 2015. –С.4-6.
- 23 Журавлева Л.А. Лесные пожары. Тушение водяным паром / Л.А. Журавлева // Техносферная безопасность: наука и практика. Межд. науч.-практич. конференция. – Саратов, 2015. –С.6-9.
- 24 Журавлева Л.А. Использование ручных ранцевых огнетушителей для борьбы с природными пожарами / Л.А. Журавлева, Р.Н. Павлусенко, О.А. Бурдеева // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды: Матер. I нац. научн.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2019. –С. 409-412
25. Журавлева Л.А. Повышение эффективности средств пожаротушения природных пожаров / Л.А. Журавлева // Безопасность жизнедеятельности в техносфере. 2 Межд. инт.-конф. 22-23 октября 2014. Белгород. –С.25-29
26. Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М: Наука, 1970. –103 с.

27. Ковалев А.Н. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров / А.Н. Ковалев, Л.А. Журавлева // Научная жизнь. – 2012. – №4. – С. 153-158.
28. Коляда А.В. Оптимизация процесса тушения лесного пожара с использованием имитационного моделирования / А.В. Коляда // Ученые записки РГСУ. – 2010. – №8. – С. 89–94.
29. Комаровский В. С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2010. – 154 с.
30. Комиссаров С.В. Методика оптимизации технологий тушения низовых лесных пожаров / С.В. Комиссаров, С.Н. Орловский, И.В. Голубев // Вестник Красноярского ГАУ. – 2007. – №6. – С. 241–246.
31. Краткий справочник физико-химических величин. 7-е изд. / К.П. Мищенко, А.А. Равдела. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
32. Кустов М.В., Калугин В.Д., Коврегин В.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности. Сборник научных трудов. Выпуск 29, 2011
33. Лесхозснаб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://protivpozhara.com/>– (Дата обращения 30.01.2021).
34. Лоцилов С.А. Влияние термокинетических параметров пиролиза и двухъярусности лесных горючих материалов на процессы распространения лесных пожаров: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Н. Новгород, 2013. – 116 с.
35. Методика тушения ландшафтных пожаров (утв. МЧС России 14 сентября 2015 г. № 2-4-87-32-ЛБ) от ГАРАНТ. РУ: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71145496/#ixzz5cS6cRmdq> – (Дата обращения 30.01.2021).
36. Макарова Н.В. Статистика в Excel: учебное пособие / Н.В. Макарова, В.Я. Трофимец. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 365с.
37. Масленников Д.А. Определение оптимальных параметров тушения лесного пожара при подаче воды в ближайшую к источнику воды точку / Д.А. Масленников, Л.Ю. Катаева, Н.А. Лоцилова // Приоритетные направления развития науки и образования. Матер. III Межд. науч.-практ. конф. – 2014. – С. 34–35.
38. Молокова С.В. Разработка инженерных методов обеспечения пожарной безопасности в лесном комплексе: дис. ... канд. техн. наук. – Братск, 2008. – 142 с.
39. Моторыгин Ю.Д. Системный анализ моделей описания процессов возникновения и развития пожара. дис. ... д-ра. тех. наук. – Санкт-Петербург, 2011. – 246 с.
40. Орловский С.Н. Методика расчета рабочего органа грунтомета для тушения кромки лесного низового пожара / С.Н. Орловский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2014. – №4 (340). – С. 52–60.
41. Отчет о результатах совместного контрольного мероприятия «Проверка эффективности планирования и расходования бюджетных средств, предусмотренных на техническое оснащение субъектов Российской Федерации

лесопожарной техникой и оборудованием, и использования приобретенного имущества в 2019 году и истекшем периоде 2020 года» (с контрольно-счетными органами субъектов Российской Федерации

42 Охрана окружающей среды в России. 2020: Стат. сб./Росстат. – 0-92 М., 2020. – 113 с.

43. Патент СССР 256516 / Зуев В.А., Иванов Н.И., Савельев Т.И. Зажигательный аппарат // Пат. СССР № 256516. Свердловский НИИ лесной промышленности. Оpubл. 1969, БИ № 34.

44. Патент СССР № 297361. Филиппов А.В. Способ предотвращения распространения лесного пожара // Пат. СССР № 1297547/29-14. Заявл. 07.01.69. Оpubл. 1971. БИ № 10.

45. Патент СССР № 589991. Худоногов Ю.А., Михайлова Н.Я., Лещинская З.Я. Способ ограничения распространения лесных пожаров // Пат. СССР № № 2337118/29-12. Заявл. 17.03.76. Оpubл. 1972. БИ № 4.

46. Патент РФ № 592416. Арцыбашев Е.С., Бортниа А.М., Глезер В.М. Способ остановки фронта лесного пожара // Патент РФ № 2302157/29-12. Заявл. 22.12.75. Оpubл. 1978. БИ № 6.

47. Патент РФ № 772555. Григорьев Б.В., Григорьева Е.А. Устройство для локализации пожара // Патент РФ № 240492/29-12. Заявл. 23.03.79. Оpubл. 1980. БИ № 39.

48. Патент РФ № 902761. Артемов О.А. Способ остановки фронта лесного пожара // Патент РФ № 2839371/29-12. Заявл. 14.11.79. Оpubл. 1982. БИ № 5.

49. Патент РФ № 93694. Арцыбашев Е.С., Акакиев Ф.И., Васильев О.А. Способ ограничения распространения лесного пожара // Патент РФ № 3000611/29-12. Заявл. 04.11.80. Оpubл. 1982. БИ № 23.

50. Патент РФ № 1134202. Гришин А.М., Бабаев В.М., Абалтусов В.Е. Способ ограничения распространения лесных пожаров // Патент РФ № 3515538/29-12. Заявл. 09.07.91. Оpubл. 1985. БИ № 2.

51. Патент РФ № 1147413. Гришин А.М., Бабаев В.М., Абалтусов В.Е. Способ локализации лесных пожаров // Патент РФ № 3359093/29-12. Оpubл. 1985. БИ № 12.

52. Патент РФ № 1247019. Маслак В.Г., Королев Ю.С. Способ тушения пожаров водой // Патент РФ 3840937/29-12. Заявл. 09.01.85. Оpubл. 1986. БИ № 28.

53. Патент РФ № 1210855. Спатаренко А.И. Способ тушения пожара // Патент РФ № 3519367/29-12. Заявл. 03.11.82. Оpubл. 1986. БИ № 6.

54. Патент РФ № 1335302. Вейнберг И.П. Устройство для тушения пожара // Патент РФ № 4057307/29-12. Заявл. 21.04.86. Оpubл. 1987. БИ № 33.

55. Патент СССР № 1703136. Мусин М.З. Способ локализации лесного низового пожара // Патент СССР № 4631863/12. Заявл. 04.01.89. Оpubл. 1992. БИ № 1.

56. Патент РФ № 1556687. Гришин А.М., Голованов А.Н., Зятнин В.И. Способ локализации лесных пожаров // Патент РФ № 4358906/31-12. Заявл. 05.01.88. Оpubл. 1990. БИ № 14.

57. Патент РФ № 2020988. Петрушанский В.Б., Акимкина М.А., Аитова Г.Г. Метаемый огнетушитель // Патент РФ № 4827190/12. Заявл. 21.05.90. Оpubл. 1994. БИ № 19.

58. Патент СССР № 1651925. Стельмахович С.В., Груманс В.М., Суприянович Н. Е. Способ остановки лесного пожара // Патент СССР № 4675755/12. Заявл. 11.04.89. Оpubл. 1991. БИ № 20.

59. Патент РФ № 1639667. Буробин В.Н., Верещина А.И., Ключитков Г.Я. Способ тушения пожара горячей поверхности и устройство для его осуществления // Патент РФ № 4658516/12. Заявл. 03.03.89. Оpubл. 1991. БИ № 13.

60. Патент СССР № 1664334. Стельмахович С.В., Груманс В.М., Суприянович Н.Е. Устройство для зажигания напочвенного покрова // Патент СССР № 4683892/12. Заявл. 25.04.89. Оpubл. 1991. БИ № 27.

61. Патент Франция № 2656533. Plantefeve F. Противопожарная сеть: // Патент Франция № 9000188. Заявл. 03.01.90. Оpubл. 5.07.91.

62. Патент СССР № 1789234. Маслюк В.Г., Королев Ю.С., Пургин Б.А. Способ тушения пожара распыленной водой // Патент СССР № 1789234. Заявл. 03.07.90. Оpubл. 23.01.93. Бюл. № 3.

63. Патент РФ № 93008165. Плагин А.И., Процаенко С.В., Бурангулов Н.И. Устройство для тушения пожаров // Патент РФ № 93008165/03. Заявл. 11.02.93. Оpubл. 27.06.95.

64. Патент РФ № 2014857. Онищенко В.В. Способ тушения пожара Пат. 2014857 Россия // Патент РФ № 4935129/12. Заявл. 04.04.91. Оpubл. 1994. БИ № 12.

65. Патент РФ № 2055767. Захматов В.Д., Самгин Ю.С. Ручное огнетушащее импульсное устройство // Патент РФ № 93031985/12. Заявл. 24.06.93. Оpubл. 10.03.96.

66. Патент РФ № 2036674. Бабкин А.Н., Бобров А.Н., Бочков А.Г.; Щербаков А. А. Способ получения огнетушащей струи // Патент РФ № 93015104/12. Заявл. 23.03.93. Оpubл. 1995. БИ № 16.

67. Патент РФ № 2033827. Григорян С.С., Гулакян К.А., Шахназаров А.А.; Григорян С.С. Способ тушения и предупреждения пожаров на пространственно протяженных объектах и устройство для его осуществления // Патент РФ № 5000061/12. Заявл. 09.07.91. Оpubл. 1995. БИ № 12.

68. Патент РФ № 2050866. Кононов Б.В., Пак З.П. Способ тушения пожара и установка пожаротушения // Патент РФ № 5067194/12. Заявл. 04.09.92. Оpubл. 1995. БИ № 36.

69. Патент РФ № 93055047/26. Щетинин В.Г. Аэрозольобразующий состав для тушения пожаров // Патент РФ № 93055046/26. Заявл. 10.12.93. Оpubл. 1995. БИ № 19.

70. Патент РФ № 93046247. Криворотов А.С. Бомба противопожарная, способ тушения пожара // № 93046247/08. Заявл. 30.09.93. Оpubл. 27.11.96.

71. Патент РФ № 93057925. Щетинин В.Г. Генератор нейтрального газа // Патент РФ № 93057925/12. Заявл. 29.12.93. Оpubл. 20.08.96.

72. Патент РФ № 2064306. Симонов В.В., Симонова Е.М., Гришин В.А. и др. Ранцевый огнетушитель // Патент РФ № 5100472/08. Заявл. 19.11.91. Оpubл. 27.07.96.

73. Патент РФ № 93008165/03. Плагин А.И., Процаенко С.В., Бурангулов Н.И. Устройство для тушения пожаров // Патент РФ № 93008165/03. Заявл. 11.02.93. Оpubл. 27.06.95.

74. Подольская А.С. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз / А.С. Подольская, Д.В. Ершов, П.П. Шуляк // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т 8. – №1. – С. 118–126.

75. Практикум по статистике: учебное пособие / А.П. Зинченко, А.Е. Шибалкин, О.Б. Тарасова, Е.В. Шайкина; под ред. А.П. Зинченко. – М.: Колос, 2001. – 392с.

76. Ранцевые огнетушители Ранцевые огнетушители: виды, плюсы, минусы, модели (savesys.ru) [Электронный ресурс]. – (Дата обращения 30.01.2018)

77. Разливанов И.Н. Математическое моделирование процессов развития пожара и пожаротушения в условиях ограниченности сил и средств: дис. канд. наук. – Санкт-Петербург, 2009. –185 с.

78. Ранец противопожарный «РП-15-Ермак+». Паспорт «РП-15 Ермак+» ПС. ООО «Лесхозснаб». –10 с.

79. Рекомендации по тушению и обнаружению лесных пожаров // Сборник организационно-распорядительных документов по охране лесов от пожаров. – М.: ВНИИЦ Лесресурс,1997. – С. 27-113.

80. Романова Н.А. Влияние водного барьера на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. – 2013. – №27. – С. 26–34.

81. Романова Н.А. Влияние интенсивности сброса воды на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. – 2013. – №27. – С. 35–40.

82. Романова Н.А. О зависимости массового расхода воды для успешного тушения лесного пожара от температуры точки прицела / Н.А. Романова, А.А. Лоцилов, И.В. Беляев, Л.Ю. Катаева // Фундаментальные исследования. – 2014. – №6–7. – С. 1380–1383.

83. Руденко М. Г. Кавитация и фазовые превращения в условиях термодинамической неравновесности жидкости: Автореферат д-ра тех наук. – Улан-Удэ, 2011. – 36 с.

84. Роечко В.В.Технология температурно-активированной воды: физическая сущность, история разработки, перспективы развития / В.В. Роечко, А.П. Кармес // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. –№3. –С. 15-20.

85. Сводная статистика лесных пожаров в РФ. Динамика основных показателей обстановки с лесными пожарами в РФ за 2009-2016 гг. (wiki-fire.org. – Электронная энциклопедия пожарного дела).



86. Сныткин Г.В. Лесные пожары и борьба с ними на Крайнем Северо-Востоке Сибири: дис. ... д-р с.-х. наук. – М., 2002. – 315 с.

87. Соловьев В.А. Совершенствование технических средств для борьбы с природными пожарами / В.А. Соловьев, Р.Н. Палусенко, С.С. Шаров // Научная жизнь. – 2018. – №9. – С. 5-13.

88. Соловьев Д.А. Повышение эффективности использования ручных ранцевых огнетушителей для борьбы с лесными пожарами / Д.А. Соловьев, Р.Н. Павлусенко, Ю.Ф. Сосновчик // Научная жизнь. – 2018. – № 12. – С.8-19.

89. Соловьев Д.А. Improvement of technical means for wildfires control / Д.А. Соловьев, Л.А. Журавлева, Р.Н. Павлусенко // Аграрная наука в XXI веке: проблемы и перспективы. Сборник статей Всероссийской науч.-практ. конф. Саратовский ГАУ. – 2018. – С. 719-723.

90. Справочник. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. Изд.: в 2 книгах; кн. 1 / Ф.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М., Химия, 1990. – 496 с.

91. Терещенко В.В. Противопожарная защита и тушение пожаров / В.В. Терещенко, Н.С. Артемьев, В.А. Грачев, О.Ю. Сабинин. Книга 7. – М., 2006. – 412 с.

92. Тушение лесных пожаров. Учебно-методическое пособие. Государственное бюджетное учреждение Архангельской области «Служба спасения». – Архангельск, 2013.

93. Федосеева Т.А. Исследование зависимости эффективности тушения лесного пожара стационарным источником от диапазона температур зоны подачи воды / Т.А. Федосеева, А.Д. Постнов, И.В. Беляев, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, Н.А. Лощилова, А.А. Лощиков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №11–2. – С. 204–209.

94. Ходаков В. Е. Лесные пожары: методы исследования: монография / В. Е. Ходаков, М.В. Жарикова. – Херсон: Гринь Д.С., 2011. – 470 с.

95. Храмов С.П. Инновационные технологии пожаротушения температурно-активированной водой / С.П. Храмов, Е.Д. Доронов, А.В. Пряничников, А.П. Кармес // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: сб. материалов научно-практической конференции. – Гомель: ГИИ, 2008. – С. 84-91.

96. Чижиков В.П., Кулев Д.Х. Физико-химические способы борьбы с задымленностью при пожарах. Обзорная информация / В.П. Чижиков, Д.Х. Кулев. – М.: ВНИИПО, 198. – 55 с.

97. Чукичев А.Н. Технологические и теоретические основы фрезерно-металлических машин для тушения лесных пожаров грунтом: Автореф. дис. ... д-р техн. наук. – СПб., 1995. – 40 с.

98. Щербаков И.С. Методика тушения низовых лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2005. – 149 с.

99. Яковлев В.Б. Статистика. Расчеты в Microsoft Excel / В.Б. Яковлев. – М.: Колос, 2005. – 352 с.

100. Abhineet Jainl. Forest fire risk modelling using Remote Sensing and Geographic Information System / Abhineet Jainl, Shirish A. Ravan, R.K. Singh, K.K. Das and P.S. Roy // Current Science. № 70(10). – 1996.– S. 928-933.
99. IFEX 3000 - Technology - mitfunf «Schussen» wirdeinPkw - Brand geloscht! Haselgrubler T. // Brennpunkt. –1995. – 47 № 1. –S. 1-3.
101. Catalog. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lessnab.com/katalog/lesopozharnoe-oborudovanie/ruchnoy-pozharnyy-instrument/ranets-protivopozharnyy-rp-18-ermak> – (Дата обращения: 20.03.2021).
102. Fernandez A. Automatic Mapping of Surfaces Affected by Forest Fires in Spain Using AVHRR NDVI Composite Image Data / Fernandez A., P. Illera and J.L. // Remote Sensing of the Environment. Casanova, 1997. – S.153-162.
103. Larisa A Zhuravleva. Biological Analysis of the Efficiency of Sprayed Water and Steam Applied Against Forest Fire / L. A Zhuravleva, R. N. Pavlusenko, O. A. Burdeeva, S. V. Istomin, Y. F. Sosnovchik // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJABR). Online ISSN 2278-599X, Special Issue-1 2019. – pp. 42-49.
104. Roy P.S. Forest fire and degradation assessment using satellite remote sensing and geographic information system / P.S. Roy // Indian Institute of Remote Sensing (NRSA) Dehra Dun. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. – pp. 361-400.
105. Steyaert, L.T. Land Cover Mapping, Fire Regeneration, and Scaling Studies in the Canadian Boreal Forest with 1-km AVHRR and Landsat TM data / Steyaert, L.T., F.G. Hall and T.R // Loveland Journal of Geophysical Research. – 1997. 102(d24): – pp. 29581-29598.



Д.М. Бенин, Л.А. Журавлева

# ТУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Монография

ISBN 978-5-00140-827-7



Подписано в печать 15.07.2021 г.

Формат 60×84 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,09. Тираж 100 экз. Заказ № 2914-21/15071.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами  
в ООО «Амирит», 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.

Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33

E-mail: [zakaz@amirit.ru](mailto:zakaz@amirit.ru)

Сайт: [amirit.ru](http://amirit.ru)